Г. Н. Степанова

ФИЗИКА

11

МИКРО - МЕГА -

ББК 74.262.22
УДК 373 53
С 79

*Все права на данное издание защищены,
любая форма использования копий издания целиком
или частями допускается только с разрешения автора
и издательства.*

Степанова Г. Н.

С 79 Физика. 11 класс. I полугодие: Учебник для общеобразовательных учреждений. — СПб.: ООО «СТП Школа», 2004. — 160 с., ил.
ISBN 5-98198-005-2

УДК 373 53
ББК 74.262.22

ISBN 5-98198-005-2

© Степанова Г. Н. 2003
© Издательство «СТП Школа» 2003

ВОЛНЫ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Волновые явления, с изучения которых мы начинаем последний год обучения в школе, играют огромную роль в жизни человека.

Эта роль в значительной степени обусловлена тем, что практически всю информацию, поступающую к человеку из окружающего мира по сенсорным каналам, приносят волны. При этом более 90% информации приходится на долю зрительного канала. Эту информацию, как вам хорошо известно, приносит свет. Так человек называет **электромагнитные волны** из небольшого диапазона длин волн: примерно от 380 нм до 760 нм.

Около 9% информации человек получает по слуховому каналу.

Эту информацию несут звуковые волны, которые представляют собой **механические волны**. Диапазон частот звуковых волн тоже невелик, примерно от 20 Гц до 20 кГц.

Человек «освоил» звуковые волны значительно раньше световых: он научился говорить, то есть стал использовать свой голосовой (речевой) аппарат для осуществления коммуникативных связей друг с другом. Человеческая речь стала уникальным средством связи и общения людей, она играет важнейшую роль в развитии интеллекта человека.

Сегодня, в третьем тысячелетии, человек уже довольно уверенно пользуется и электромагнитными волнами, приспособив их для передачи информации на огромные расстояния за минимальное время. Для этого человек использует специальную радио- и телеаппаратуру, изобретенную и воплощенную в жизнь благодаря неистребимой любознательности, наблюдательности, мощному интеллекту, настойчивости и трудолюбию ученых, инженеров, рабочих.

Очень важно, что свет и звук приносят человеку разную информацию об одном и том же объекте. Они дополняют друг друга, позволяя получать целостную, обобщенную картину явления. Отчасти поэтому мы будем изучать волновые явления и механической и электромагнитной природы параллельно.

Совместное изучение таких, на первый взгляд, разных явлений становится возможным еще и потому, что они обнаруживают поразительное сходство в свойствах. Вам хорошо известно, что в волновых процессах отсутствует перенос вещества, но происходит передача энергии из одних точек пространства в другие и что волны способны передавать энергию другим телам при взаимодействии с ними.

При этом они в зависимости от условий (размеров тел по сравнению с длиной волны, свойств вещества и его состояния и т.п.) способны отражаться от тел, проникать внутрь тел, а также, изменяя направление распространения, огибать преграды. Вы знаете, что одновременно в пространстве может существовать множество волн от разных источников, не мешая друг другу и сохраняя свою «индивидуальность».

Это сходство нашло свое отражение и в физическом смысле величин, и в форме уравнений, при помощи которых описывают волновые явления независимо от их природы, и в общности следствий и выводов, которые можно получить на основе анализа этих уравнений.

Но есть еще одно очень важное обстоятельство: изучение волновых явлений позволит нам перейти от изучения классических физических теорий к современным, пересмотреть обыденные представления о пространстве и времени, движении и взаимодействии — этих ключевых понятиях физической науки.

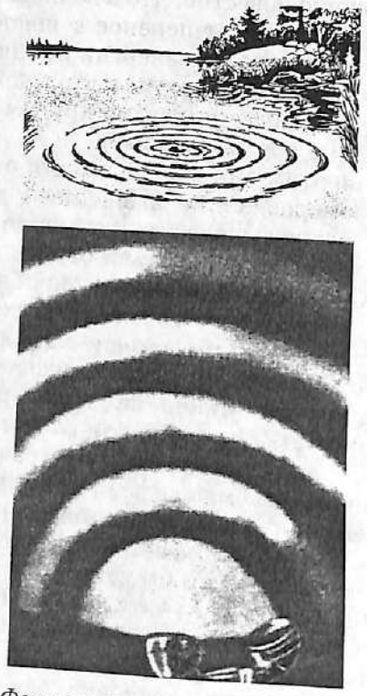
Действительно,пока мы изучали преимущественно тела, локализованные в пространстве («вместилище» тел), и явления (то есть всевозможные изменения), происходящие с телами в течение времени.

Основными моделями до сих пор были модели материальной точки и абсолютно твердого тела.

Теперь мы будем изучать «бесконечную однородную и изотропную среду» и электромагнитное поле, существующее в неограниченном пространстве, а также изменения, происходящие с ними или в них.

Чтобы обнаружить эти изменения, нам придется искать ответы на два вопроса: что имеет место в разных точках среды или поля в один и тот же момент времени или что происходит в данной точке среды в разные моменты времени. Вот на этом-то пути и ждут нас новые удивительные открытия. Итак, вперед к новым знаниям!

§ 1. ВОЛНЫ В УПРУГИХ СРЕДАХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА



Фотография звуковой волны от телефонной трубки в инфракрасном свете

Вам уже известно, что, приступая к изучению новых явлений, следует оговорить условия или границы, в рамках которых мы будем действовать и проводить соответствующие рассуждения, а также создать физическую модель объекта и механизм изучаемого явления.

При создании модели сначала обращаются к реальному объекту, выявляют те его свойства, которые принципиально важны в данном явлении. Остальные, менее значимые свойства, не учитывают.

В качестве реального процесса выберем процесс распространения волн на поверхности воды в мелком сосуде, имеющем сравнительно большую площадь дна.

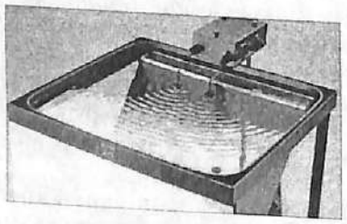
Такой выбор не случаен: ведь каждый своими глазами может увидеть, что будет происходить на поверхности воды, если, например, в сосуд бросить небольшой камешек. Чтобы «увидеть» звуковые волны, нужны довольно сложные устройства, например, фотокамеру, работающую в инфракрасном свете. А процесс распространения электромагнитных волн пока вообще «увидеть» нельзя.

В ходе наблюдения реального процесса можно обнаружить следующее. Во-первых, чтобы наблюдать волновой процесс нужна «среда», во-вторых, внешний по отношению к ней, объект должен воздействовать на «какую-то» точку среды, «возмущая ее», то есть приводя в движение.

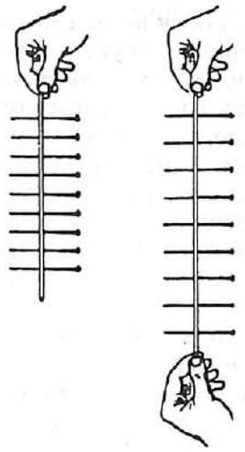
В этом случае по поверхности воды, распространяясь по всем направлениям, от одной точки поверхности к другим «побежит» волна. Вместо спокойной горизонтальной свободной поверхности воды мы увидим «деформированную» поверхность. На ней можно в каждый момент времени выделить «горбы» и «впадины», то есть места, где поверхность воды приподнята и где она расположена ниже первоначального положения свободной поверхности воды в сосуде. «Горбы» и «впадины» не стоят на месте, а перемещаются по поверхности, бегут, распространяясь от места падения камня во все стороны симметрично.

Значит, конструируя модель среды, необходимо высказать предположения об ее свойствах. Во-первых, эта среда должна состоять из отдельных частиц, которые могут менять свое положение по отношению

Волновая ванная — прибор для наблюдения волн на поверхности воды



Картина распространения волн от двух источников в волновой ванне

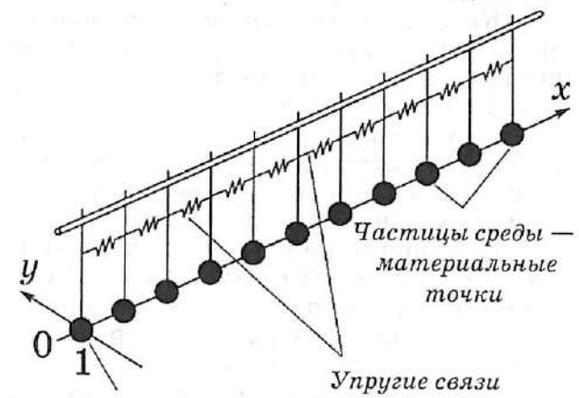


Сила упругости:
1. Возникает при деформации тела.
2. Направлена в сторону, противоположную направлению смещения частей тела при деформации.
3. При малых деформациях выполняется закон Гука

$$F_x = -kx,$$

где k — жесткость тела, x — значение деформации.

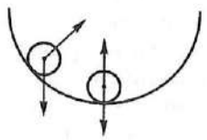
Абсолютно упругая бесконечная среда — физическая модель вещества:
1. Состоит из частиц (не молекул!), размеры которых значительно больше размеров молекул, но малы по сравнению с длиной волны.
2. Между частицами действуют только потенциальные силы (силы упругости).
3. При относительном движении частиц силы трения и сопротивления не возникают.



Частицы среды — материальные точки

Упругие связи между частицами среды

Источник волны — колеблющаяся частица среды



Устойчивое равновесие: *если вывести тело из этого положения возникают силы, возвращающие его в первоначальное состояние*

друг к другу. Во-вторых, эти частицы должны взаимодействовать между собой (говорят: между этими частицами должны существовать «связи»). В противном случае движение не передавалось бы от одной точки среды к другой. В-третьих, силы взаимодействия между частицами должны меняться при изменении расстояния между ними (упругие силы или силы тяготения).

Наконец, силы сопротивления, неизбежно возникающие при движении, должны быть весьма незначительными, иначе процесс может так быстро затухать, что нам не удастся выяснить его основные закономерности.

Таким образом, приходим к модели **абсолютно упругой среды**. Это среда, состоящая из одинаковых материальных частиц (то есть имеющих массу), взаимодействующих между собой только силами упругости или тяготения (потенциальными или, иначе, консервативными силами).

Для того, чтобы сначала не отвлекаться на различные «краевые» эффекты, будем считать, что такая однородная и изотропная упругая среда имеет очень большие размеры (по сравнению с длиной волны). Следовательно, нашей рабочей моделью будет модель бесконечной, однородной, изотропной упругой среды.

Если в такой среде выбрать какое-либо направление, то механическая модель этой среды может иметь такой вид, как это показано на рисунке. На нем «частицы среды» — материальные точки — упругие стальные шарики, связаны между собой «упругими связями» — пружинками. Массы пружинок равны нулю (пренебрежимо малы по сравнению с массой шариков). Шарики подвешены на нитях, силы упругости которых компенсируют силы тяжести шариков.

Допустим, что в начальный момент времени частицы среды покоятся относительно друг друга*. Тогда при отсутствии внешнего воздействия никакие движения внутри среды возникнуть не могут, частицы среды и сама среда находятся в состоянии устойчивого равновесия.

Чтобы в среде «появилась» волна, необходимо внешнее воздействие — источник

* Это вполне очевидное предположение должно предотвратить возможную ошибку: частицы среды в данном случае не должны ассоциироваться с молекулами среды (вещества), ведь молекулы находятся в непрерыном движении.

Параметры гармонического колебания:

1. Амплитуда, y_m — значение наибольшего смещения тела от положения равновесия;

2. Период, T — промежуток времени, в течение которого тело совершает одно полное колебание;

3. Частота, ν — величина обратная периоду, число колебаний тела за 1 с

$$\nu = \frac{1}{T}$$

4. Циклическая частота, ω — число колебаний тела за 2π секунд

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

5. Начальная фаза колебания, φ_0 — величина, однозначно определяющая состояние колеблющегося тела в момент времени $t = 0$, аргумент тригонометрической функции косинус (синус)

Уравнение гармонического колебания:

$$y = y_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

волны. Простейший источник волны — точечный источник, он воздействует на какую-то одну частицу среды. В дальнейшем мы будем рассматривать только гармонические (синусоидальные или косинусоидальные) волны, как наиболее простой с точки зрения математического описания случай. Поэтому допустим, что источник волны «заставляет» данную частицу среды совершать колебание с частотой ν и амплитудой y_m.

Рассмотрим механизм образования волны. На рисунках показаны положения отдельных частиц среды в моменты времени, соответствующие долям периода колебаний: $t = 0$, $t = T/4$, $t = T/2$, $t = 3T/4$ и $t = T$.

Прокомментируем их. Когда частица 1 под действием источника волн выходит из положения равновесия, происходит деформация «связи-пружинки», приводящая к появлению силы упругости, которая, в свою очередь, приводит в движение частицу 2. Изменение положения частицы 2 приводит к деформации следующей «связи-пружинки» и движению частицы 3 и так далее. Частица-источник «тянет» за собой ближайшую к ней частицу среды, выводя ее из положения равновесия в направлении своего движения.

Каждая последующая частица среды включается в движение несколько позже предыдущей, то есть запаздывает в движении. Поэтому к моменту времени $t = T/4$, когда частица 1 достигнет своего максимального отклонения от положения равновесия, в движение придут не все частицы среды, а только некоторые из них.

Изменение направления движения частицы 1 приведет к изменению вида деформации «связи-пружинки», теперь вместо деформации растяжения пружинка сжимается. Изменяется направление силы упругости. Теперь она направлена против скорости движения частицы 2, поэтому продолжая двигаться в сторону от положения равновесия, эта частица, достигнув положения максимального смещения, начнет двигаться к положению равновесия вслед за частицей 1.

Однако, к моменту времени $t = T/2$ она, в отличие от частицы 1, не успеет вернуться в положение равновесия. То же можно сказать и о других частицах среды. В данный момент времени каждая из них, до которых к этому моменту времени дошло возбуждение, занимает вполне определенное положение по отношению к положению равновесия. Его можно увидеть на соответствующем рисунке.

Вынужденные колебания:

1. Происходят под действием внешней (по отношению к частице) вынуждающей периодической силы.

2. Частота колебаний равна частоте вынуждающей силы.

3. Амплитуда колебаний зависит от значения вынуждающей силы и параметров колеблющейся точки.

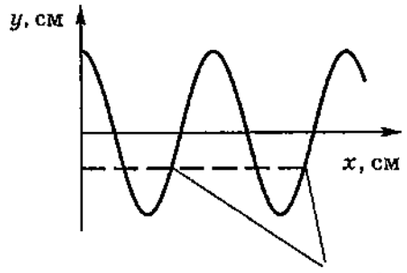
Положение колеблющейся в волне произвольной частицы по отношению к положению равновесия в зависимости от времени

В эти разные моменты времени состояние данной колеблющейся точки полностью повторяется:

$$y_1 = y_2;$$
$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2;$$

но точка возвращается в это состояние спустя $\Delta t = t_2 - t_1 = T$

Расположение частиц среды в волне в некоторый момент времени t



Эти две разные точки среды A и B в данный момент времени находятся в одинаковых состояниях:

$$y_A = y_B;$$
$$\vec{v}_A = \vec{v}_B;$$

но $x_B - x_A = \lambda$.

Движение частиц среды в течение следующей половины периода колебаний источника полностью аналогично описанному, только теперь ближайшие к источнику частицы, достигнув положения равновесия, продолжают движение от него в другом направлении до тех пор, пока не достигнут максимального (амплитудного) отклонения от положения равновесия, а затем начнут двигаться в направлении к положению равновесия.

Не трудно сообразить, что каждая точка среды в таком процессе совершает вынужденные колебания с частотой и амплитудой источника волны, но фаза колебания у каждой точки своя.

При этом, чем дальше от источника вдоль выбранного направления находится частица среды, тем больше ее запаздывание, отставание от колебаний источника.

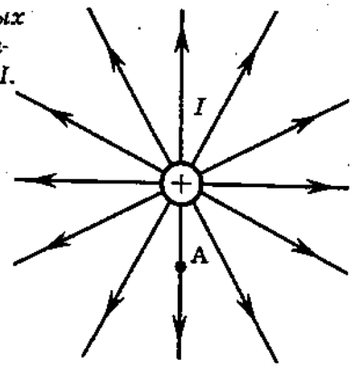
Если источник волны действует постоянно , то в волновое движение включаются постепенно все частицы среды.

Таким образом, в каждый момент времени в упругой среде можно наблюдать вполне определенное распределение ее частиц по отношению к их положению устойчивого равновесия (мгновенная фотография частиц среды). В каждый следующий момент времени положение частиц среды оказывается иным, ведь в среде происходит волновой процесс. Говорят: волна бежит. Однако, среди частиц среды можно указать такие, которые в данный момент времени находятся в одинаковых состояниях (то есть сместились из положения равновесия в одном направлении на одно и то же расстояние и имеют одно и то же направление скорости).

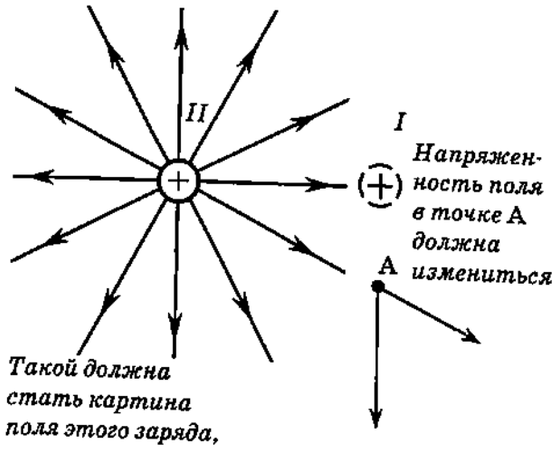
Не трудно заметить, что в однородной среде такие частицы среды находятся на одинаковых расстояниях друг от друга. Таким образом, волное движение обладает периодичностью двух видов.

Первый вид — это периодичность во времени, проявляющаяся в том, что движение любой частицы среды полностью повторяется через время, равное периоду колебаний источника волны. Второй вид — это периодичность в пространстве. Она проявляется в том, что расположение частиц среды повторяется через одинаковые расстояния, равные длине волны.

Картина силовых линий поля заряда в положении I.

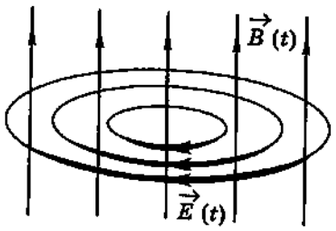


Точечный заряд передвинули из положения I в положение II.

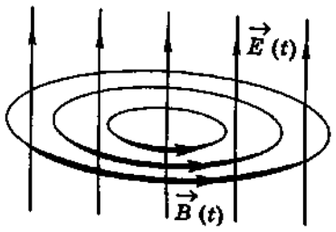


Напряженность поля в точке А должна измениться

Такой должна стать картина поля этого заряда, спустя некоторое время



Индукция магнитного поля увеличивается, поэтому появляется вихревое электрическое поле



Напряженность электрического поля увеличивается, поэтому появляется вихревое магнитное поле

Мы рассмотрели механизм образования механических волн. Теперь рассмотрим механизм образования волн электромагнитных.

Как вы знаете, электромагнитные волны способны распространяться не только в веществе (упругие среды), но и в вакууме. Так, например, свет Солнца и звед, прежде чем попасть в земную атмосферу, проходит в космическом пространстве огромные расстояния. Поэтому для простоты рассмотрим сначала процесс распространения электромагнитной волны в вакууме. Для наглядности будем проводить аналогии с механизмом образования механической волны.

В качестве источника волны выберем колеблющийся по грамоническому закону точечный заряд. Им вполне может быть колеблющийся электрон.

Сначала рассмотрим процесс изменения поля, созданного точечным зарядом, при изменении положения заряда в пространстве.

Когда заряд покоится в выбранной системе отсчета, в окружающем его бесконечном пространстве существует электростатическое поле.

Напряженность этого поля вдоль произвольно выбранного нами направления изменяется от одной точки пространства к другой обратно пропорционально расстоянию от заряда. Но в каждой точке остается постоянной во времени. Если теперь вывести заряд из этого положения, то есть привести его в движение, и поместить в другую, соседнюю точку, то электрическое поле вблизи него изменится. Но изменяющееся во времени электрическое поле, в соответствии с гипотезой Максвелла, вызовет появление переменного магнитного поля. Линии индукции магнитного поля охватывают линии напряженности электрического поля, то есть «захватывают» новые области пространства.

Теперь, в соответствии с явлением электромагнитной индукции, изменяющееся во времени магнитное поле вызовет появление переменного электрического поля. Его линии напряженности охватывают линии индукции магнитного поля. Они находятся в тех областях пространства, где уже имелось «прежнее» электрическое поле. Теперь изменяющееся электрическое поле вызовет появление нового магнитного, и так далее. В тех местах, где происходит наложение полей одного названия (магнитное с магнитным, а электрическое с электрическим) по принципу суперпозиции можно найти результирующее поле.

Принцип суперпозиции:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_{1A} + \vec{E}_{2A} + \ldots + \vec{E}_{nA};$$
$$\vec{B}_A = \vec{B}_{1A} + \vec{B}_{2A} + \ldots + \vec{B}_{nA}.$$

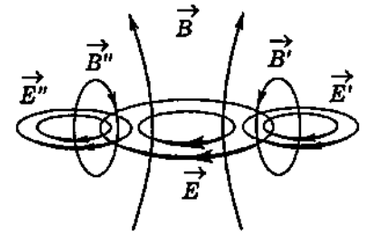
Правило Ленца:

1. *Если* $\vec{B}\uparrow, \Delta\vec{B}\uparrow\uparrow\vec{B}$, *то* $\vec{B}_i\downarrow\uparrow\Delta\vec{B}$, *и* $\vec{B}_i\downarrow\uparrow\vec{B}$;

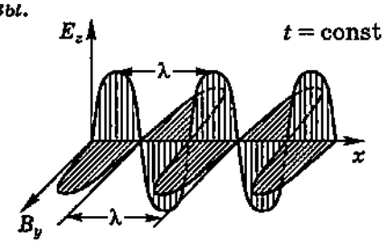
Если $\vec{B}\downarrow, \Delta\vec{B}\downarrow\uparrow\vec{B}$, *то* $\vec{B}_i\downarrow\uparrow\Delta\vec{B}$, *и* $\vec{B}_i\uparrow\uparrow\vec{B}$;
направление вектора напряженности вихревого электрического поля находим по правилу буравчика (правый винт).

2. *Если* $\vec{E}\uparrow, \Delta\vec{E}\uparrow\uparrow\vec{E}$, *то* $\vec{E}_i\downarrow\uparrow\Delta\vec{E}$, *и* $\vec{E}_i\downarrow\uparrow\vec{E}$;

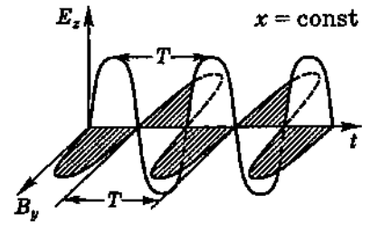
Если $\vec{E}\downarrow, \Delta\vec{E}\downarrow\uparrow\vec{E}$, *то* $\vec{E}_i\downarrow\uparrow\Delta\vec{E}$, *и* $\vec{E}_i\uparrow\uparrow\vec{E}$;
направление вектора индукции вихревого магнитного поля находим по правилу буравчика (левый винт).



В один и тот же момент времени в точках, расстояние между которыми равно длине волны, значения и направления векторов напряженности и индукции электромагнитного поля одинаковы.



В любой точке пространства значения и направления векторов напряженности и индукции электромагнитного поля волны повторяются через промежуток времени, равный периоду колебания.



Если применить правило Ленца и определить направления полей, то нетрудно видеть, что во внутренних (ближе к заряду) областях пространства, где поле данного названия уже имелось, происходит «гашение» или ослабление поля. В «новых» областях пространства происходит его возрастание.

Таким образом, перемещение заряда вдоль некоторого направления приводит к появлению «всплеска» электромагнитного поля, который распространяется в пространстве, охватывая все новые и новые области и одновременно перестраивая «старое» (свое собственное!) поле, которое существовало до смещения заряда.

Спустя некоторое время в пространстве будет существовать другое электростатическое поле.

Этот процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был описан Максвеллом, происходит с конечной, хотя и очень большой скоростью. Он приводит к перестройке прежнего поля, если заряд, создающий его, сдвинули в другое место.

Если же заряд привести в колебательное движение, то в непосредственной близости от него электрическое поле будет изменяться с частотой колебания заряда.

Переменное электрическое поле вызовет появление переменного, меняющегося с той же частотой, магнитного поля, которое создаст переменное же электрическое поле в новых областях пространства и так далее.

То есть в пространстве будут существовать взаимосвязанные, изменяющиеся с одинаковой частотой, порождающие друг друга электрические и магнитные поля, образующие единый периодически изменяющийся как во времени, так и в пространстве процесс — **бегущую электромагнитную волну**.

На рисунках показано мгновенное распределение векторов напряженности электрического и индукции магнитного полей в электромагнитной волне, а также графики изменения вектора напряженности и вектора индукции соответствующих полей в данной точке пространства в зависимости от времени.

Механическая волна	Электромагнитная волна
Где могут распространяться?	
Упругая среда	Вакуум, упругая среда
Что является источником волны?	
Колеблющееся тело y_m, ν	Колеблющийся электрический заряд y_m, ν
Каков механизм распространения волны?	
Деформация упругих связей между частицами среды приводит к передаче движения от одной точки среды к другой	Способность переменного магнитного поля порождать переменное электрическое поле и обратно
Каков характер движения частиц или изменения характеристик объекта?	
Точки среды совершают вынужденные колебания с частотой источника	Векторы напряженности и индукции электромагнитного поля совершают колебания с частотой источника
От чего зависит амплитуда колебаний в разных точках волны?	
Амплитуда колебания в данной точке волны зависит от мощности источника, от расстояния до источника	Амплитудные значения векторов напряженности и индукции магнитного поля в данной точке волны зависят от мощности источника, от частоты колебаний и от расстояния до источника
Основные параметры волнового процесса	
Частота колебаний Период колебаний Циклическая частота	одинаковы во всех точках волны и равны соответствующим параметрам источника
Скорость волны —	конечная, зависит от свойств среды
Длина волны —	зависит от частоты источника и свойств среды (например, от скорости распространения волн)
Фаза колебания —	зависит от местоположения соответствующей точки в волне и начальной фазы колебаний источника
Характерные особенности	
Отсутствие переноса вещества волной Перенос энергии от источника волны	

Таким образом, сравнивая механизмы образования механической волны в упругой среде и электромагнитной волны в вакууме, можно обнаружить следующие общие признаки.

Для возбуждения гармонической бегущей волны необходим источник, который совершает колебания с некоторой частотой и амплитудой сколь угодно долго.

С этой частотой, в дальнейшем, будут совершать движение все частицы среды или будут изменяться векторы напряженности и индукции электромагнитного поля в волне соответствующей природы.

Фазы колебания разных частиц среды или векторов напряженности и индукции электромагнитного поля в разных точках пространства различны. Чем дальше от источника находится рассматриваемая точка пространства, тем позже в ней начинается волновой процесс.

Волны распространяются в пространстве (среде) с конечной скоростью.

Расстояние, на которое распространяется волна за время равное периоду колебаний источника, называется длиной волны. В точках, отстоящих друг от друга на расстояние, равное длине волны, колебания частиц среды или векторов напряженности и индукции электромагнитного поля, происходят в одинаковой фазе.

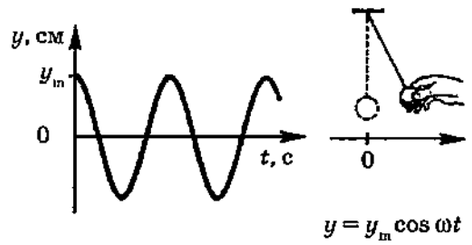
Волновые процессы разной природы обладают периодичностью во времени и пространстве. Если сравнить между собой мгновенные распределения частиц среды (или векторов напряженности и индукции электромагнитного поля в волне), полученные с интервалом времени, равным периоду колебаний источника или кратным ему, то они совпадут.

Если сравнивать между собой состояния частиц или значения и направления соответствующих векторов в электромагнитной волне в точках, отстоящих друг от друга на расстояние, равное длине волны или кратное ей, в разные моменты времени, но они также совпадут.

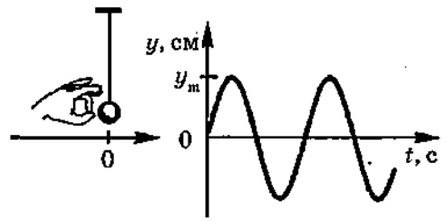
Волны переносят от источника к другим точкам пространства или частицам среды энергию.

Единственное отличие механических волн от электромагнитных состоит в принципиальной необходимости для их образования существования упругой среды. Это определяется различной природой этих волновых процессов.

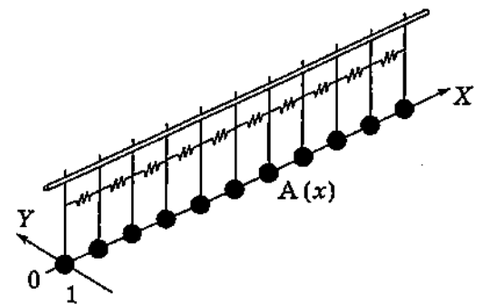
§ 2. УРАВНЕНИЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

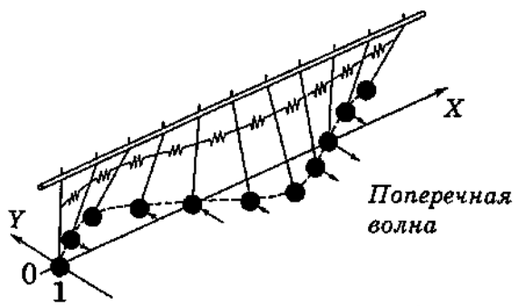


$y = y_m \cos \omega t$

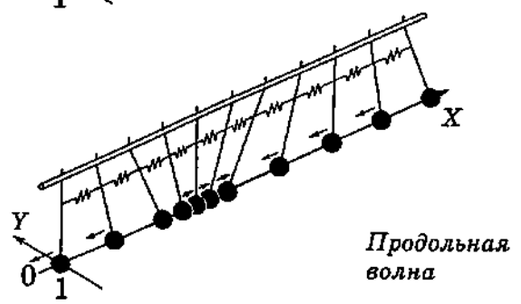


$y = y_m \sin \omega t$





Поперечная волна



Продольная волна

Изучив в общих чертах механизм образования волны, мы установили, что каждая частица упругой среды (или векторы напряженности и индукции электромагнитного поля в каждой точке пространства) совершают вынужденные колебания с частотой источника. При этом фаза колебания этой частицы отличается от фазы колебания источника тем больше, чем дальше от него находится эта частица.

Мы установили также, что волновое движение распространяется в упругой среде или в вакууме (в случае электромагнитной волны) с конечной постоянной скоростью, которая зависит от свойств самой среды. Поэтому, зная, на каком расстоянии от источника волны находится интересующая нас частица среды в волне, мы можем рассчитать время, которое необходимо для того, чтобы волновое движение достигло этой частицы.

Именно на это время и происходит запаздывание начала колебаний данной точки. А это означает, что, располагая только этими данными, мы можем составить **уравнение бегущей волны.**

Оно позволит нам описывать волновой процесс математически.

Снова обратимся к нашей модели. Пусть частица 1 в ней является источником волны. Направим ось *OX* вдоль линии, соединяющей выделенные частицы среды, а ось *OY* перпендикулярно к ней.

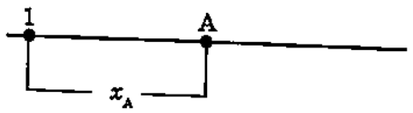
В нашем случае колебания источника происходят вдоль направления, перпендикулярного к направлению распространения волны. Такие волны, как вы помните из курса основной школы, называются поперечными.

В продольной волне колебания источника, а вслед за ним и остальных частиц среды, происходят вдоль направления распространения волны.

На рисунках показаны оба эти случая, чтобы вам было понятно, что наши рассуждения в полной мере описывают и поперечные, и продольные волны.

Выберем в среде произвольную частицу А, находящуюся на выбранном луче (оси *OX*) на расстоянии x от источника.

Тогда разделив это расстояние на скорость волны, получим время запаздывания начала колебаний этой частицы по отношению к началу колебаний источника волны.



Частица 1 (*источник*):

$y = y_m \cdot \sin \omega t$

y_m – *амплитуда колебания;*

ωt – *фаза колебания;*

ω – *циклическая частота колебания*

Частица A:

$y = y_m \cdot \sin \omega (t - \tau) = y_m \cdot \sin (\omega t + \varphi_{0A})$

y_m – *амплитуда колебания;*

$(\omega t + \varphi_{0A})$ – *фаза колебания;*

φ_{0A} – *начальная фаза колебания;*

ω – *циклическая частота колебания;*

$\tau_A = \dfrac{x_A}{\upsilon}$ – *время запаздывания*

$$\varphi_{0A} = \omega \tau_A = \frac{\omega x_A}{\upsilon} = \frac{2\pi x_A}{T\upsilon} = 2\pi \cdot \frac{x_A}{\lambda}$$

Уравнение бегущей волны

$$y_A = y_m \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x_A}{\upsilon} \right),$$

y_A – *значение смещения частицы A в волне из положения равновесия;*

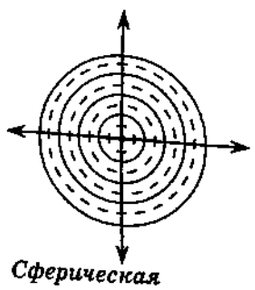
y_m – *амплитуда колебания точки A,*

$\omega \left(t - \dfrac{x_A}{\upsilon} \right)$ – *фаза колебания точки A,*

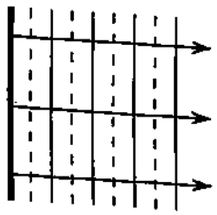
ω – *циклическая частота колебаний,*

x_A – *расстояние от источника до точки A,*

υ – *скорость волны в данной среде.*



Сферическая волна



Плоская волна

Пусть источник волны совершает гармонические колебания, которые описываются таким уравнением:

$$y = y_m \cdot \sin \omega t.$$

Принимаем, что при $t = 0$ $y = 0$ (отсюда начальная фаза колебаний источника равна нулю).

Поскольку данная частица A среды в волне совершает вынужденные колебания, то их частота равна частоте колебаний источника, то есть ν или ω, если воспользоваться циклической частотой. Тогда можем записать уравнение движения этой частицы среды, после того как до нее дойдет волна. Это уравнение гармонического колебания с некоторой амплитудой y_m, частотой ω и начальной фазой φ_{0A}:

$$y_A = y_m \cdot \sin (\omega t + \varphi_{0A}).$$

Теперь остается найти начальную фазу колебания частицы A. Для этого запишем уравнение колебания этой точки иначе. Учтем, что колебания этой частицы точно такие же, как и у источника, только начинаются с опозданием во времени на

$$\tau_A = \frac{x_A}{\upsilon};$$

тогда

$$y_A = y_m \cdot \sin \omega (t - \tau_A) = y_m \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x_A}{\upsilon} \right).$$

Полученное нами уравнение позволяет подсчитать координату у любой частицы в волне в любой интересующий нас момент времени, если известны параметры колебаний источника волны, скорость распространения волны в данной среде и расстояние до данной точки от источника. Это и есть уравнение бегущей волны $y = y(x, t)$.*

Если вы припомните сведения из курса физики основной школы, то согласитесь с тем, что это частный случай плоской или линейной волны. В случае волн сферических амплитуда колебаний частиц быстро уменьшается с увеличением расстояния от источника до данной частицы.

К обсуждению этих вопросов мы еще вернемся позже. А пока попробуем извлечь из полученного уравнения новую информацию и осмыслим ее.

* В принципе, его можно было бы записать в более общем виде, если допустить, что начальная фаза колебаний источника не равна нулю, а также учесть тот факт, что амплитуда колебаний частиц среды в волне, вообще говоря, может и не совпадать с амплитудой колебаний источника.

$$\omega \cdot \frac{x_A}{\upsilon} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{x_A}{\upsilon} = 2\pi \cdot \frac{x_A}{\lambda}$$

Длина волны

1. Обозначение: λ.

2. Единица длины волны: метр, $[\lambda] = $ м.

3. Характеристика волны в данной среде.

4. Зависит от частоты источника и скорости распространения волны в среде.

5. Расстояние, на которое распространяется волна в данной среде за время, равное периоду колебаний источника

$$\lambda = \upsilon T$$

$$\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}$$

$$\lambda = \frac{2\pi\upsilon}{\omega}$$

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Если рассматриваем данную точку среды,

то $x = \text{const}$, *тогда:*

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = y_m \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi_x \right),$$

где $\varphi_x = \text{const}$.

Если рассматриваем данный момент времени,

то $t = \text{const}$, *тогда:*

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = y_m \cdot \sin \left(\varphi_t - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right),$$

где $\varphi_t = \text{const}$.

В случае продольной волны:

$$s = s_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Границы применимости уравнения бегущей волны:

1. Размеры среды очень велики по сравнению с длиной волны.

2. Силы трения и сопротивления малы.

3. Колебания источника волны — гармонические.

Проведем простые математические преобразования уравнения. Для этого рассмотрим выражение для фазы колебания выбранной нами частицы среды. Раскрывая скобки и выражая циклическую частоту через период колебания источника, получим следующее:

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

В этой записи уравнения отчетливо видна та двоякая периодичность, о которой мы говорили раньше. При фиксированном значении x_A функция периодична по времени и период ее равен периоду колебаний источника волны.

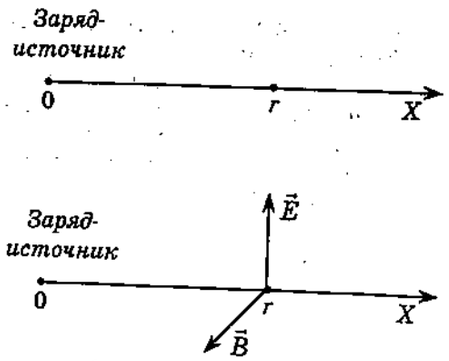
При фиксированном моменте времени t функция периодична по x, то есть «по пространству» и периодом ее является длина волны. Это означает, что замена t на $t + T$ и x на $x + \lambda$ смещение частицы от положения равновесия согласно уравнению остается одним и тем же.

Это уравнение позволяет рассчитать сдвиг фаз в колебаниях разных точек волны. Если расстояние между точками равно длине волны λ (или кратно ей, $k\lambda$, где k — целое число), то сдвиг фаз равен 2π (или $2k\pi$, где k — целое число) и точки колеблются **синфазно**. Если расстояние между точкам равно половине длины волны $\lambda/2$ (или кратны ей, $k\lambda/2$, где k — целое число), то колебания происходят **в противофазе**.

Как мы уже говорили, данное уравнение описывает процессы не только в поперечной волне, но и в продольной.

В случае продольной волны удобно координату y заменить обозначением s, которое, как и y, играет роль смещения частицы от положения равновесия, но отсчитывается не поперек (перпендикулярно) оси распространения волны, а вдоль направления распространения волны (ось OX).

Это уравнение записано для гармонической волны, то есть простейшей модели волнового движения. Реальные плоские волны можно считать приблизительно гармоническими, если затухание бегущей волны в пределах одной длины волны очень мало и в рассматриваемой среде укладывается большое количество длин волн. То есть среда, в которой распространяется реальная волна, по своим свойствам близка к модели: бесконечной абсолютно упругой однородной изотропной среде.



$$\vec{E}=\vec{E}_m \sin\omega\left(t-\frac{r}{c}\right);$$

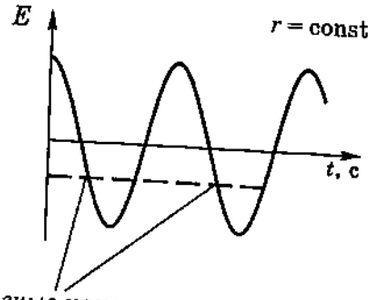
E_m – *амплитуда вектора напряженности;*

ω – *циклическая частота колебаний заряда-источника;*

c – *скорость распространения электромагнитных волн в вакууме;*

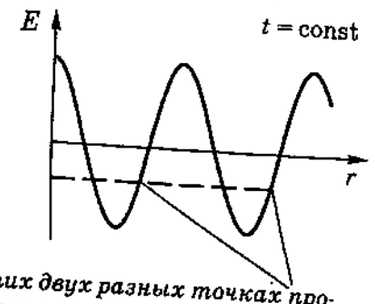
$$\vec{B}=\vec{B}_m \sin\omega\left(t-\frac{r}{c}\right),$$

B_m – *амплитуда вектора индукции.*



В эти разные моменты времени вектор напряженности электромагнитного поля в данной точке пространства полностью повторяется:

$$\vec{E}(r,t)=\vec{E}(r,t+T)$$



В этих двух разных точках пространства в данный момент времени векторы напряженности поля изменяются синфазно.

Запишем теперь уравнение бегущей электромагнитной волны.

От точечного заряда, совершающего гармонические колебания, распространяется сферическая волна. Выберем какое-нибудь направление, вдоль которого будем измерять расстояние r от заряда до интересующей нас точки пространства.

В любой точке на расстоянии r от заряда происходят гармонические колебания вектора напряженности и вектора магнитной индукции электромагнитного поля. Фазы колебаний этих векторов зависят от расстояния r и скорости распространения электромагнитных волн в данной среде: чем дальше от источника находится рассматриваемая точка, тем сильнее запаздывают колебания в ней по сравнению с колебаниями заряда-источника:

$$\begin{cases}\vec{E}=\vec{E}_m \sin\omega\left(t-\frac{r}{c}\right);\\ \vec{B}=\vec{B}_m \sin\omega\left(t-\frac{r}{c}\right).\end{cases}$$

Как следует из теории электромагнитного поля Максвелла, фаза колебаний вектора магнитной индукции совпадает с фазой колебаний вектора напряженности электрического поля.

Амплитуда колебаний также меняется от одной точки к другой, ведь волна — сферическая, она уменьшается по мере увеличения расстояния обратно пропорционально расстоянию (см. § 4).

Если теперь перейти от циклической частоты к периоду колебаний заряда-источника и заменить произведение периода колебаний и скорости волны на длину электромагнитной волны, то и в случае электромагнитной волны обнаружим периодичность двоякого рода: периодичность во времени, определяемую собственно периодом колебаний источника, и периодичность в пространстве, определяемую длиной волны:

$$\begin{cases}\vec{E}=\vec{E}_m \sin\ 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{r}{\lambda}\right);\\ \vec{B}=\vec{B}_m \sin\ 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{r}{\lambda}\right).\end{cases}$$

Таким образом, уравнения бегущей волны имеют одинаковую форму для волн разной природы.

§ 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Дано: *СИ*

$v = 400$ м/с

$\nu = 200$ Гц

$y_m = 5$ мкм $\quad 5\cdot10^{-6}$ м

$y(x, t)$ — ?

Решение:

1. Уравнение бегущей волны

$$y=y_m \sin\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)$$

2. Найдем циклическую частоту по известной частоте колебаний

$$\omega=2\pi\nu$$

3. Проведем вычисления

$$\omega=2\pi\cdot200\ \text{Гц}=400\pi\,\frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\frac{1}{v}=\frac{1}{400\ \text{м}}\,\frac{\text{с}}{}=2{,}5\cdot10^{-3}\,\frac{\text{с}}{\text{м}}$$

4. Окончательно получим

$$y=5\cdot10^{-6}\sin 400\pi(t-2{,}5\cdot10^{-3}x);$$

$$y=5\cdot10^{-6}\sin(400\pi t-\pi x),$$

в единицах СИ.

Дано: *СИ*

$\lambda = 5$ м

$y_m = 30$ мкм $\quad 3\cdot10^{-5}$ м

$T = 5$ мс $\quad 5\cdot10^{-3}$ с

$x_1 = 7{,}5$ м

$t = 10$ с

$y(x,t);\ y(t);\ y(x)$ —?

Решение.

1. Уравнение бегущей волны:

$$y=y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)$$

2. Подставим в уравнение числовые значения и упростим выражение:

$$y=3\cdot10^{-5}\sin\ 2\pi\left(\frac{t}{5\cdot10^{-3}}-\frac{x}{5}\right)=$$

$$=3\cdot10^{-5}\sin\ 2\pi(200t-0{,}2x)$$

(в единицах СИ).

Как обычно при разборе решения задач будем представлять рассуждения параллельно с традиционной записью решения.

Задача 1. Волна распространяется в среде со скоростью 400 м/с. Напишите уравнение волны, если частота источника 200 Гц, а амплитуда равна 5 мкм.

Выпишем условие задачи, а затем запишем в общем виде уравнение бегущей волны.

Перечислим те параметры волны, которые входят в это уравнение и найдем их, пользуясь определением.

Поскольку в задаче предлагается написать уравнение для конкретной волны, то уравнение будет содержать числовые коэффициенты. Их необходимо подсчитать и выразить в единицах СИ.

Обычно при подсчетах число π сохраняют в буквенном написании, если оно входит в аргумент тригонометрической функции.

Наконец, нужно подставить полученные коэффициенты в уравнение волны. Не забудьте указать, в каких единицах записаны числовые коэффициенты в уравнении.

Задача 2. Длина волны равна 5 м, а ее амплитуда составляет 30 мкм. Напишите уравнение волны, если период колебаний источника равен 5 мс. Напишите уравнение колебаний точки, находящейся на расстоянии 7,5 м от источника и уравнение, описывающее расположение точек среды через 10 с от начала колебаний источника.

Первая часть задачи практически повторяет решение предыдущей.

После записи условия задачи запишем в общем виде уравнение бегущей волны, найдем необходимые параметры волны по определению, проведем расчеты и подставим числовые коэффициенты, выраженные в единицах СИ, в уравнение волны.

Для того, чтобы записать следующие уравнения, необходимо вычислить соответствующий параметр полученного в явном виде уравнения волны. В первом случае

3. Найдем уравнение зависимости смещения колеблющейся в волне точки от времени:

$$y = 3\cdot10^{-5}\sin 2\pi\,(200t - 0{,}2\cdot7{,}5) =$$
$$= 3\cdot10^{-5}\sin\,(400\pi t - 3\pi) =$$
$$= 3\cdot10^{-5}\sin\,(400\pi t - \pi)$$

Данная точка колеблется в противофазе с источником.

4. Запишем уравнение расположения точек в волне в зависимости от расстояния в один и тот же момент времени:

$$y = 3\cdot10^{-5}\sin 2\pi\,(200\cdot10 - 0{,}2x) =$$
$$= 3\cdot10^{-5}\sin\,(2\pi\cdot2000 - 0{,}4\pi x) =$$
$$= -\,3\cdot10^{-5}\sin 0{,}4\pi x$$

Дано:	*СИ*
$t = 0{,}5$ мин	30 с
$N = 60$	
$\lambda = 1{,}5$ м	
v — ?	

Решение.

1. По определению периода колебаний:

$$T = \frac{t}{N}$$

2. По определению длины волны:

$$\lambda = v\cdot T$$

3. Выразим скорость волны:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda\cdot N}{t}$$

4. Проверим наименование:

$$[v] = \left[\frac{\lambda\cdot N}{t}\right] = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

5. Выполним расчеты:

$$v = \frac{1{,}5\text{ м}\cdot60}{30\text{ с}} = 3\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Дано:

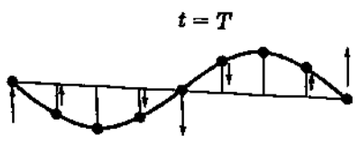
$\lambda = 0{,}3$ м

$t = T$

$y_1 = +\,0{,}5\,y_m$

$y_2 = -\,0{,}5\,y_m$

x_1 — ? x_2 — ? x_3 — ? x_4 — ?



известно расстояние от источника до рассматриваемой точки, поэтому получим зависимость $y(t)$.

Во втором — известен момент времени, в который нас интересует пространственное распределение точек среды в волне.

Во всех случаях, проводя математические преобразования, следует помнить, что формулы значительно упрощаются, если учесть, что функция синус периодическая, ее наименьший период равен 2π и

$$\sin(\alpha \pm 2k\pi) = \sin\alpha,$$

а также, что функция синус нечетная, то есть $\sin(-\alpha) = -\sin\alpha$.

Задача 3. Рыбак, наблюдая за поплавком в ветреную погоду, подсчитал, что за полминуты поплавок на волнах совершил 60 колебаний. Он заметил также, что расстояние между соседними впадинами волн равно 1,5 м. Определите скорость волн.

Скорость волн полностью определяется свойствами среды. От нее зависит, какой будет длина волны в данной среде, если в ней начнет действовать тот или иной источник.

В данном случае источником волн является порывистый ветер. Частоту или период колебаний можно подсчитать по числу колебаний, совершенных поплавком за известное время, так как поплавок совершает вынужденные колебания с частотой источника вместе с волной.

Расстояние между соседними впадинами представляет собой расстояние между двумя соседними точками в волне, колеблющимися в одинаковой фазе, то есть равно длине волны.

Таким образом, для решения задачи нужно воспользоваться формулой связи длины волны с периодом колебаний и скоростью ее распространения.

Задача 4. На каком расстоянии от источника волны находится частица, смещение которой из положения равновесия составляет половину амплитудного значения в момент времени, равный периоду колебаний? Длина волны в среде равна 0,3 м.

Записывая условие задачи, задумайтесь над смыслом выражения «смещение частицы из положения равновесия равно

Решение.

1. Запишем уравнение волны для данного момента времени:

$$y = y_m\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = y_m\sin 2\pi\left(\frac{T}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) =$$
$$= y_m\sin\left(2\pi - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = y_m\sin\left(-\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = -y_m\sin\frac{2\pi x}{\lambda}$$

2. Подставим в это уравнение известное значение смещения точки:

$$-\frac{y_m}{2} = -y_m\sin\frac{2\pi x}{\lambda} \quad \text{и} \quad +\frac{y_m}{2} = -y_m\sin\frac{2\pi x}{\lambda};$$

$$\sin\frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{1}{2} \qquad \sin\frac{2\pi x}{\lambda} = -\frac{1}{2}$$

$$\frac{2\pi x_1}{\lambda} = \frac{\pi}{6} \quad \frac{2\pi x_2}{\lambda} = \frac{5\pi}{6} \quad \frac{2\pi x_3}{\lambda} = \frac{7\pi}{6} \quad \frac{2\pi x_4}{\lambda} = \frac{11\pi}{6}$$

$$x_1 = \frac{\lambda}{12} \quad x_2 = \frac{5\lambda}{12} \quad x_3 = \frac{7\lambda}{12} \quad x_4 = \frac{11\lambda}{12}$$

3. Проведем вычисления:

$$x_1 = \frac{0{,}3}{12} = 0{,}025\text{ (м)}$$

$$x_2 = \frac{5\cdot0{,}3}{12} = 0{,}125\text{ (м)}$$

$$x_3 = \frac{7\cdot0{,}3}{12} = 0{,}175\text{ (м)}$$

$$x_4 = \frac{11\cdot0{,}3}{12} = 0{,}275\text{ (м)}$$

Дано:

1 точка	*2 точка*
$x_1 = 9$ м	$x_2 = 15$ м

$v = 300$ м/с

$\nu = 25$ Гц

$(\varphi_1 - \varphi_2)$ —?

Решение.

$$\varphi_1 = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) \qquad \varphi_2 = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi\left(\frac{x_2}{\lambda} - \frac{x_1}{\lambda}\right) = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{\lambda};$$

Так как $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$, то $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi\nu(x_2 - x_1)}{v}$.

$$[\varphi_1 - \varphi_2] = \left[\frac{2\pi\nu(x_2 - x_1)}{v}\right] = \frac{\text{рад}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}}{\text{м}\cdot\text{с}^{-1}} = \text{рад}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi\cdot25\cdot6}{300} = \pi$$

Колебания происходят в противофазе.

половине амплитудного». В этом высказывании отсутствует указание на то, в какую сторону от положения равновесия «вниз» или «вверх» сместилась данная точка среды. Поэтому при решении задачи разберем оба случая.

Для того, чтобы решение было наглядным, изобразим примерное расположение точек среды в волне в момент времени $t = T$.

Иллюстрация, приведенная на стр. 14, наглядно демонстрирует, что точек, которые к заданному моменту времени смещены из положения равновесия на половину амплитудного смещения, четыре. Их координаты по оси OX нам нужно найти.

Поскольку в задаче известно значение смещения точки среды в заданный момент времени, нужно записать уравнение плоской волны для данного частного случая. Мы уже проделывали такую операцию при решении задачи 2.

Теперь необходимо решить тригонометрическое уравнение с одним неизвестным.

Обратите внимание, что каждое из уравнений дает по два решения, то есть всего четыре значения для координаты точек. Их графическая интерпретация была проведена выше.

Задача 5. Определите разность фаз колебаний двух частиц среды, удаленных от источника на расстояния, равные соответственно 9 м и 15 м, если скорость распространения волны равна 300 м/с, а частота колебаний источника равна 25 Гц.

Для получения ответа в этой задаче нужно найти фазы колебания двух точек в волне.

Как вы помните, фазой называется аргумент тригонометрической функции синус в уравнении бегущей волны. Следовательно, нужно составить выражение для фазы колебания каждой точки, а затем найти их разность.

(Обсудите в классе два термина «разность фаз» и «изменение фазы». В каком случае уместно использовать каждый из этих терминов? Каков физический смысл знаков «+» или «—» у этих величин?)

Дано:

$\lambda = 6$ м

$t_1 = t_2 = 1$ с

если $\vec{u} \downarrow\uparrow \vec{v}$

$N_1 = 5$

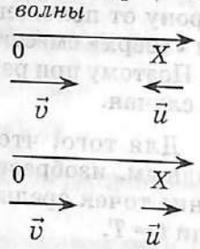
если $\vec{u} \uparrow\uparrow \vec{v}$

$N_2 = 3$

первый удар $t=0$

u —? v —?

Направление распространения волны



Решение:

1. Перейдем в систему отсчета, связанную с катером:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u},$$

где $\vec{v}'$ – скорость волны относительно катера.

2. Катер движется навстречу волне:

$$v'_x = v_x - u_x; \quad v' = v - (-u) = v + u;$$

3. $v' \cdot t_1 = (N_1 - 1)\lambda; \quad (v+u) \cdot t_1 = (N_1 - 1)\lambda$

4. Катер движется в направлении волны:

$$v'_x = v_x - u_x; \quad v' = v - u;$$

5. $v' \cdot t_2 = (N_2 - 1)\lambda; \quad (v-u) \cdot t_2 = (N_2 - 1)\lambda$

6. Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} (v+u) \cdot t_1 = (N_1 - 1)\lambda \\ (v-u) \cdot t_2 = (N_2 - 1)\lambda \end{cases}$$

и решим ее.

$$\begin{cases} v+u = \dfrac{(N_1-1)\lambda}{t_1} \\ v-u = \dfrac{(N_2-1)\lambda}{t_2} \end{cases}$$; сложим уравнения

$$2v = \frac{(N_1-1)\lambda}{t_1} + \frac{(N_2-1)\lambda}{t_2};$$

$$v = \frac{(N_1-1)\lambda}{2t_1} + \frac{(N_2-1)\lambda}{2t_2};$$

$$u = \frac{(N_1-1)\lambda}{t_1} - v = \frac{(N_1-1)\lambda}{2t_1} - \frac{(N_2-1)\lambda}{2t_2};$$

7. Проведем вычисления.

$$v = \frac{(5-1)\cdot 6\text{ м}}{2\cdot 1\text{ с}} + \frac{(3-1)\cdot 6\text{ м}}{2\cdot 1\text{ с}} = 18\frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$u = \frac{(5-1)\cdot 6\text{ м}}{2\cdot 1\text{ с}} - \frac{(3-1)\cdot 6\text{ м}}{2\cdot 1\text{ с}} = 6\frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Задача 6. Расстояние между гребнями волн в море равно 6 м. При движении катера навстречу волне за 1 с о корпус катера ударяется 5 гребней волны, а при движении катера в обратном направлении 3 гребня волны, при этом удар первого гребня соответствует моменту времени $t = 0$.

Определите скорость катера и скорость волны.

Обозначим скорость катера относительно земли (то есть неподвижной СО) u, а скорость волны относительно земли v.

Так как гребни волны «догоняют» катер и в том случае, когда он движется в том же направлении, что и волна, $v > u$.

Тогда в системе отсчета, связанной с катером, скорость волны будет равна $(u+v)$, когда катер движется навстречу волне. Когда катер движется в обратном направлении, то есть в том же направлении, что и волна, скорость волны равна $(v-u)$.

Если подсчитать расстояние, которое проходит волна за 1 с в этой системе отсчета, то оно окажется равным в первом случае (движение навстречу волне) четырем, а при движении во втором случае — двум длинам волны. Это связано с тем, что длина волны — это расстояние между двумя соседними гребнями (а не число гребней!).

Таким образом, можно записать два уравнения с двумя неизвестными. Решая систему, найдем скорости катера и волны.

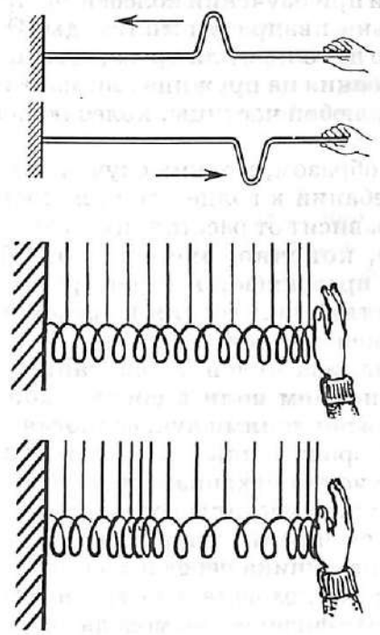
Мы приводим полное решение этой задачи в общем виде для того, чтобы показать последовательность рассуждений и преобразований. Это поможет вам, в случае необходимости, решить аналогичные, но более сложные задачи.

Завершая этот параграф, заметим, что при решении задач на применение уравнения бегущей волны или уравнений, связывающих параметры волнового процесса, нет необходимости изобретать «новый алгоритм» их решения.

Как и обычно при решении задач, нужно быть внимательным и сначала провести качественный анализ ситуации, описанной в условии задачи, сделать пояснительный рисунок или воспользоваться графической интерпретацией, и лишь затем начинать записывать и преобразовывать формулы.

Полезно также повторить вопрос о решении основных тригонометрических уравнений.

§ 4. ВОЛНЫ В СРЕДЕ. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА



В резиновом шнуре, стержне или струне волны могут распространяться только в двух направлениях, вдоль них. В волновой ванне мы наблюдали волны, распространяющиеся на поверхности воды (на плоскости). При рассмотрении электромагнитных волн мы говорили о том, что от колеблющегося точечного заряда они распространяются по всевозможным направлениям.

Понятно, что и механические волны, возникая в сплошной среде, распространяются по разным направлениям. Однако, независимо от того, имеем ли мы дело с волной, распространяющейся вдоль одного или по всевозможным направлениям, механизм возникновения волны и картина распространения волны остается прежней. Но, конечно, в каждом случае имеются и свои особенности. Рассмотрим некоторые из них более подробно.

Прежде всего напомним, что волна не переносит вещество в пространстве: каждая частица среды в волне колеблется вблизи своего положения равновесия, но переносит энергию.

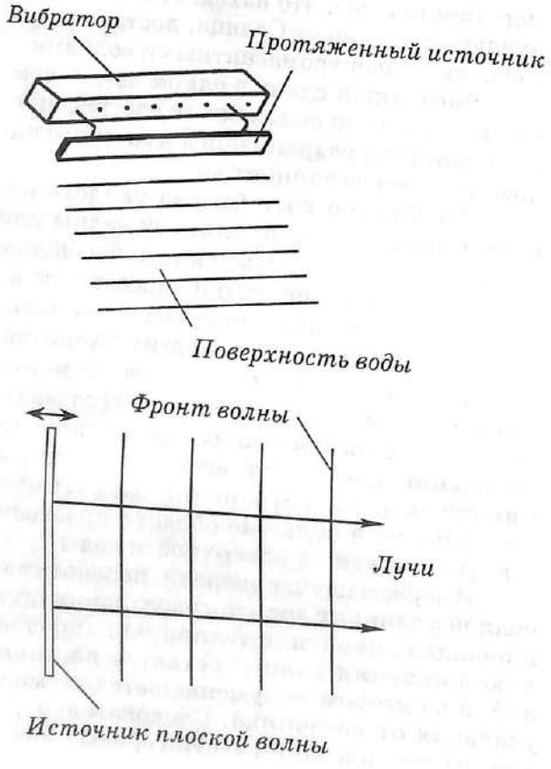
При благоприятных условиях волны могут переносить энергию на громадные расстояния с очень малыми потерями. Например, Земля и все, что находится на ней, получают энергию от Солнца, доставляемую в основном электромагнитными волнами.

Внезапный сдвиг в одном месте земной поверхности вызывает землетрясение, приводящее к разрушениям и за много километров от его эпицентра.

Достаточно хотя бы раз увидеть последствия действия приливной волны или цунами, чтобы убедиться в том, что волны несут огромную энергию и способны передавать ее телам, находящимся на их пути.

Откуда берется эта энергия? Конечно, от источника волны. Один и тот же источник постоянной мощности может создавать волну, распространяющуюся в одном направлении, а может создать волну, которая при своем распространении захватывает все большие и большие области пространства (как круги на поверхности воды).

В первом случае энергия, переносимая волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению движения волны, остается постоянной, а во втором — уменьшается по мере удаления от источника. Следовательно, и амплитуда колебаний частиц среды умень-



шается по мере удаления от источника, ведь энергия колеблющегося тела, как мы это показали при изучении колебаний, пропорциональна квадрату амплитуды. Это справедливо не только для груза, совершающего колебания на пружине или маятника, но и для любой частицы, колеблющейся в волне.

Таким образом, в одних случаях амплитуда колебаний в волне остается постоянной и не зависит от расстояния до источника (если, конечно, энергия хотя бы частично не превращается во внутреннюю за счет действия сил трения в среде), а в других — уменьшается.

Для анализа явлений, связанных с распространением волн в среде, удобно пользоваться понятиями луч, волновая поверхность и фронт волны. Рассмотрим их.

При изучении механизма передачи колебаний от одной частицы среды в волне к другой, мы выбирали направление, вдоль которого от источника передавалось волновое движение и, следовательно, его энергия.

Луч — это физическая модель, он указывает направление распространения волны и направление переноса энергии волной.

Волновой поверхностью называют поверхность, на которой лежат точки среды, совершающие колебания в одинаковой фазе. Если обратиться к уравнению бегущей волны, то нетрудно заметить, что фаза колебания будет одинаковой у частиц, которые находятся на одинаковых расстояниях от источника волны в однородной среде. Следовательно, чтобы обнаружить другие свойства волновых поверхностей, например, их форму, нужно рассмотреть некоторые частные случаи.

Если размеры источника малы по сравнению с длиной волны, то его называют точечным. Такой источник, как вы знаете, в однородной среде создает сферические волны. Это значит, что все точки, находящиеся на сфере произвольного радиуса, в центре которой находится источник, начнут колебаться одновременно, то есть колеблются в одинаковой фазе. В данном случае волновая поверхность имеет форму сферы. Форма волновой поверхности дает название волне.

Если волновая поверхность — плоскость, то волна называется плоской. Такую волну можно создать в упругой среде, если поместить в нее пластину больших размеров и заставить ее колебаться в направлении нормали к ней.

Плоская волна

1. Источник — плоскость, размеры которой значительно больше длины волны.
2. Волновые поверхности — плоскости, параллельные плоскости источника.
3. Энергия переносится в направлении, перпендикулярном плоскости источника.
4. Амплитуда колебаний во всех точках среды одинакова.

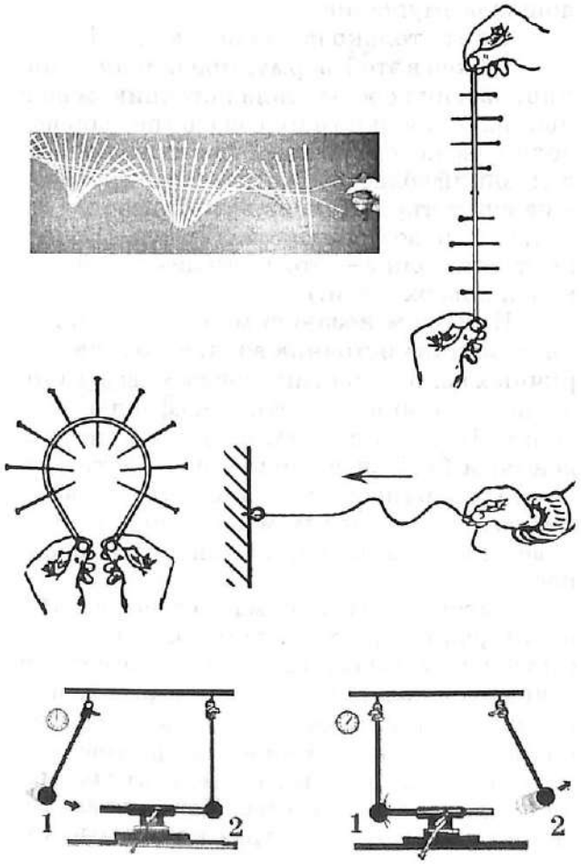
Сферическая волна

1. Источник — пульсирующая сфера, $R_0 << \lambda$.
2. Волновые поверхности — сферы, концентричные источнику.
3. Энергия переносится по радиальным направлениям.
4. Амплитуда колебаний убывает обратно пропорционально расстоянию от источника.

1. $W_{\text{колебаний}} \sim x_m^2$; в волне $x_m \sim \sqrt{W_{\text{колебаний}}}$;

2. $W_{\text{колебаний}} \sim \dfrac{W_{\text{источника}}}{4\pi r^2}$;

$$x_m \sim \sqrt{\frac{W_{\text{источника}}}{4\pi r^2}} \sim \frac{\sqrt{W_{\text{источника}}}}{r}$$



Если волновые поверхности представляют собой концентрические круги, как на поверхности воды, то волну можно назвать круговой.

Нетрудно сообразить, как расположены лучи по отношению в волновой поверхности: они перпендикулярны к ней. Тогда можно утверждать, что в плоской волне энергия источника не рассеивается и через любую волновую поверхность за единицу времени переносится одна и та же энергия, и все точки в плоской волне колеблются с одинаковыми амплитудами.

В сферической волне (ее можно получить, если поместить в однородную среду небольшую пульсирующую сферу) лучи направлены вдоль радиусов сферы. Энергия, излучаемая источником перераспределяется равномерно по поверхности сферы, радиус которой непрерывно увеличивается по мере распространения волны. А так как площадь поверхности сферы пропорциональна квадрату ее радиуса, то энергия, переносимая через единицу площади в единицу времени, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Тогда амплитуда колебаний убывает обратно пропорционально первой степени расстояния от источника.

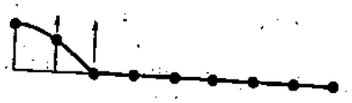
Говоря о волнах в среде, нельзя обойти вниманием вопрос о том, при каких условиях в среде могут возникать продольные или поперечные механические волны, так как электромагнитные волны при любых условиях (по своей природе) поперечные.

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, достаточно вспомнить, что к образованию волны приводит появление сил упругости при деформации упругих связей, существующих между частицами среды.

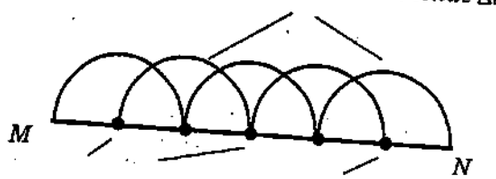
В случае продольных волн — волны сжатия и разряжения — силы упругости должны возникать при деформациях сжатия и растяжения. Такие силы упругости, как известно, возникают в любых жидких, твердых и газообразных средах.

Для возникновения поперечных волн нужно, чтобы силы упругости возникали при деформациях сдвига. Такие силы способны возникать только в твердых веществах, так как слои жидкости или газа могут смещаться друг относительно друга беспрепятственно (отсутствует упругость формы). Поперечные волны также могут возникать на поверхности жидкости (но не внутри нее!).

Х. Гюйгенс
1625 — 1695

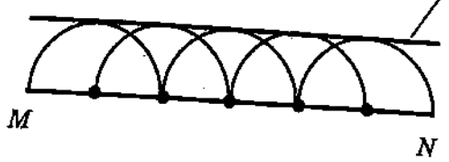


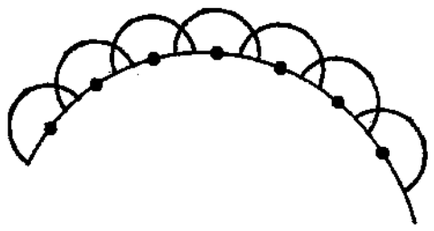
Фронты вторичных волн распространяются в течение Δt



Точки среды, до которых дошло возмущение к моменту времени t

Фронт волны в момент времени t+Δt





Понятия луча и волновой поверхности оказываются весьма полезными при анализе явлений, происходящих при взаимодействии волны с различными телами. Например, на пути волны могут находиться препятствия разных размеров и свойств. В этих случаях волны обнаруживают ряд свойств, изучение которых существенно облегчается, если воспользоваться принципом, сформулированным Х. Гюйгенсом в XVII веке и носящем его имя.

Согласно принципу Гюйгенса **каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн.**

Если вдуматься, в этой формулировке, на первый взгляд, нет ничего, что было бы нам неизвестно. Вспомните механизм образования волны. Источник «тянет» за собой, благодаря упругим силам, ближайшую к нему частицу среды. Та, в свою очередь, «тянет» за собой «свою соседку», и так далее. Уже третья в этой цепочке частица «не знает» о существовании «истинного источника волны»: для нее таким источником становится вторая частица, до которой дошло возмущение.

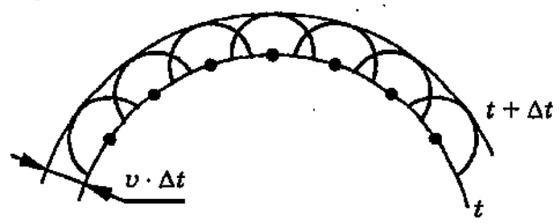
Но это только на первый взгляд!

Важен в этой формулировке сам принцип: частица среды стала источником волны, значит, можно нарисовать «переднюю» волновую поверхность — фронт волны, отделяющий область пространства, в которой уже существует волновой процесс , от остальной, невозмущенной области. (Конечно, фронт волны — это частный случай волновой поверхности.)

При этом независимо от того, каков «настоящий» источник волн, источник вторичных волн — частица среды — всегда точечный источник, то есть дает сферическую волну. В таком случае, следуя за рассуждениями Гюйгенса, можно построить волновые поверхности в данной среде в любой, интересующий нас момент времени, если известна хотя бы одна волновая поверхность.

Смотрите, пусть нам известно, что MN некоторая волновая поверхность, соответствующая моменту времени t. Рассмотрим точки этой поверхности (некоторые из них показаны на рисунке). Так как они являются источниками вторичных сферических волн, то фронт этих волн к моменту времени $t+\Delta t$ легко изобразить. Действительно, это будут сферы, в центрах которых находятся эти точки, а радиус сфер одинаков и равен произведению скорости волны в данной среде на промежуток времени Δt.

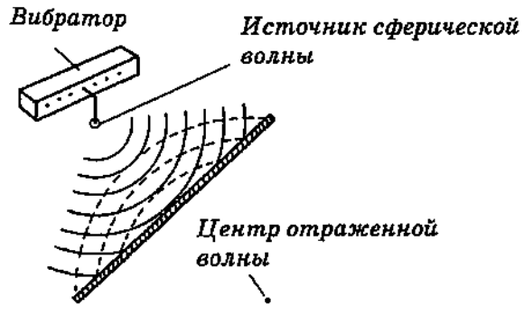
Чтобы построить фронт волны в любой момент времени необходимо:
1. Знать положение фронта в момент t.
2. Знать скорость волны.
3. Построить фронты вторичных волн, радиусом $v\Delta t$.
4. Построить огибающую фронтов вторичных волн.



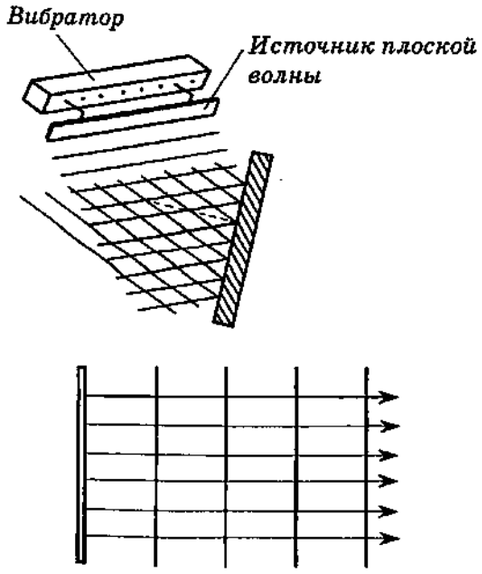
Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в момент времени $t+\Delta t$. Действительно, ведь на ней лежат все точки, до которых дошло возбуждение именно к этому моменту времени.

Впоследствии этот принцип был дополнен О. Френелем идеей об интерференции вторичных волн. В таком, новом виде принцип Гюйгенса - Френеля позволил не только объяснить свойства волн на качественном уровне, но и построить количественную теорию такого явления как дифракция.

§ 5. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛН. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН



В волновой ванне можно наблюдать отражение сферической и плоской волны от твердой преграды



Из механизма образования волны понятно, что в однородной изотропной среде волны распространяются прямолинейно. Это утверждение носит название закона прямолинейного распространения волн. Суть этого закона состоит в том, что энергия, которую несет с собой волна распространяется по лучу (по прямой линии), исходящему из источника волны.

Когда на пути волны (или луча) появляется какой-то объект (его можно рассматривать как нарушение однородности среды), наблюдается взаимодействие волны и этого объекта, результатом которого являются изменения, которые можно обнаружить, как в самом объекте, так и в волне.

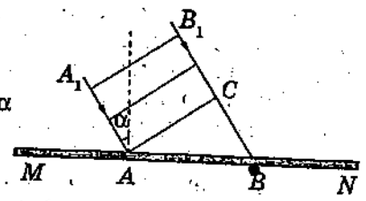
Поскольку мы изучаем свойства волн, сначала рассмотрим, что происходит с волной, когда она встречает на своем пути преграду, размеры которой очень велики по сравнению с длиной волны.

Начнем с изучения явления **отражения волн**. Напомним, что при отражении от преграды волна распространяется в той же области пространства, где раньше распространялась только падающая волна.

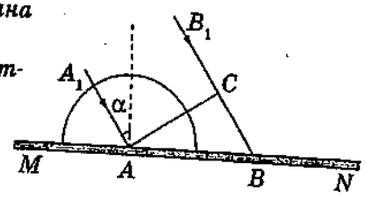
Для простоты рассуждений будем считать, что в пространстве распространяется плоская волна. На рисунке показаны волновые поверхности, фронт такой волны и несколько лучей. Пока среда остается однородной волна распространяется прямолинейно.

Но вот на пути волны появилась преграда MN, представляющая собой плос-

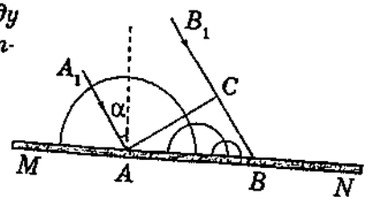
Плоская волна падает на поверхность MN под углом α



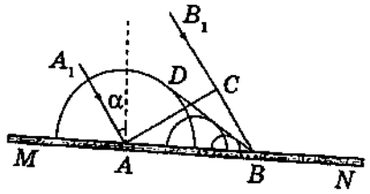
К моменту времени $t + \Delta t$ вторичная волна от точки A распространится на $v \cdot \Delta t$



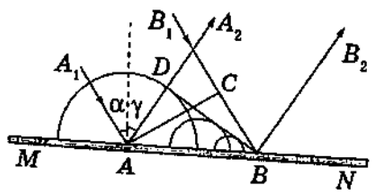
К моменту времени $t + \Delta t$ вторичные волны от точек, лежащих между A и B, распространятся на расстояния, меньшие $v \cdot \Delta t$



Фронт отраженной волны BD — огибающая к фронтам всех вторичных волн в момент времени, когда падающая волна достигла точки B



A_1A и B_1B — падающие лучи, AA_2 и BB_2 — отраженные лучи



ΔABD и ΔABC — прямоугольные, AB — общая, $AD = BC$ по построению.

Следовательно, $\Delta ABD = \Delta ABC$. Значит, $\angle CAB = \angle DBA$, но $\angle CAB = \alpha$, $\angle DBA = \gamma$, как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Отсюда, $\gamma = \alpha$.

кость больших размеров. В общем случае лучи падают на эту поверхность под углом α, который называется углом падения. Он образован падающим лучом и перпендикуляром, восставленным в точке падения луча к MN. В нашем случае $0 < \alpha < \pi/2$.

Обратите внимание: в момент времени, когда луч A_1A достиг поверхности MN, фронт волны имеет только одну общую точку с преградой — точку A.

Эта точка A по принципу Гюйгенса в этот момент времени становится источником вторичной волны, которая распространяется над отражающей поверхностью MN с такой же скоростью, что и падающая волна. Поэтому к тому моменту времени, когда фронт падающей волны достигнет поверхности MN в точке B, фронт сферической вторичной волны от точки A достигнет точек, лежащих на полуокружности радиусом, равным $R = |CB|$.

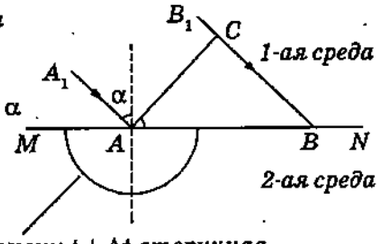
На другом рисунке показаны фронты вторичных волн от других точек поверхности MN, лежащих между точками A и B. Чем ближе к точке B находится эта точка поверхности MN, тем меньше радиус окружности фронта вторичной волны, так как тем меньше время, в течение которого эта вторичная волна распространяется.

По принципу Гюйгенса фронт отраженной волны — это огибающая фронтов вторичных волн, созданных всеми точками отрезка AB поверхности MN, к моменту времени, когда падающая волна достигла точки B, то есть касательная к изображенным полуокружностям, выходящая из точки B (ведь из точки B волна еще «не успела» никуда распространиться).

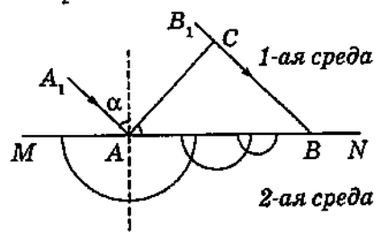
Теперь внимательно посмотрите, что произошло с фронтом волны после его взаимодействия с преградой. Форма фронта осталась прежней — отраженная волна тоже плоская, как и падающая, но направление распространения фронта (о нем мы судим по направлению лучей) изменилось.

Найти закон отражения волн очень просто, если проследить за ходом отраженного луча. Этот луч образует с поверхностью MN угол отражения γ (угол между отраженным лучом и перпендикуляром, восставленным в точке отражения луча). Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. При этом из равенства треугольников ABD и ABC следует: угол отражения равен углу падения.

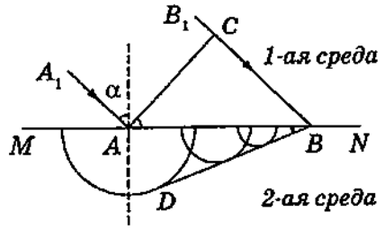
Плоская волна падает на поверхность MN под углом α



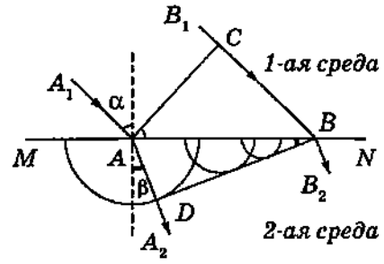
К моменту времени $t + \Delta t$ вторичная волна от точки A распространится во второй среде на $v_2 \cdot \Delta t$



К моменту времени $t + \Delta t$ вторичные волны от точек, лежащих между A и B, распространятся на расстояния, меньшие $v_2 \cdot \Delta t$



Фронт преломленной волны BD — огибающая к фронтам всех вторичных волн к моменту времени, когда падающая волна достигла точки B



A_1A и B_1B — падающие лучи, AA_2 и BB_2 — преломленные лучи

ΔABD и ΔABC — прямоугольные, AB — общая, $AD = v_2\Delta t$, $BC = v_1\Delta t$ по построению.

$$\angle CAB = \alpha, \quad \angle DBA = \gamma,$$

как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Отсюда,

$$\begin{cases} CB = v_1 \cdot \Delta t = AB \cdot \sin\alpha \\ AD = v_2 \cdot \Delta t = AB \cdot \sin\beta \end{cases} \qquad \frac{v_1 \cdot \Delta t}{v_2 \cdot \Delta t} = \frac{AB \cdot \sin\alpha}{AB \cdot \sin\beta}$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Теперь рассмотрим явление преломления волн. Даже если бы вы никогда не слышали о преломлении света, то наверняка задали бы вопрос о том, почему мы не рассматриваем вторичные волны, созданные точками отрезка AB поверхности MN по другую сторону этой поверхности. Ведь там тоже находится упругая среда, и в ней должны появиться и начать распространяться от одной точки среды к другой вынужденные колебания такой же частоты, что и в первой среде. Верно, и чтобы описать это явление — проникновение волны из одной упругой среды в другую — отметим сразу главное отличие этой второй среды от первой: в ней волны распространяются с другой скоростью.

Вот теперь применим принцип Гюйгенса и установим закон преломления волн.

Снова рассмотрим плоскую волну падающую на границу раздела двух сред MN под углом α. Когда фронт падающей волны достигнет точки A, она станет источником вторичных сферических волн, которые будут распространяться вниз от границы MN, то есть во второй среде.

К тому моменту времени, когда фронт падающей волны достигнет точки B границы раздела двух сред, от точки A, как от источника, волна во второй среде достигнет точек, лежащих на полуокружности, радиус которой зависит от скорости распространения волны во второй среде и времени, которое требуется падающей волне, чтобы пройти расстояние CB.

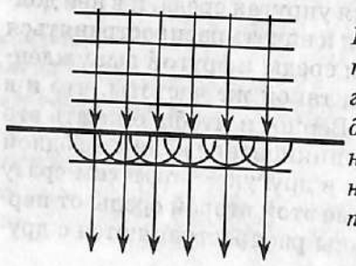
При этом возможны два случая. Первый: $R > |CB|$, второй: $R < |CB|$ (случай, когда эти расстояния равны, то есть скорости волн в обеих средах одинаковы, для нас не представляет интереса). Выполним построения для второго случая.

Теперь воспользуемся принципом Гюйгенса и построим фронт преломленной волны (огибающую к фронтам вторичных волн во второй среде выходящую из точки B). Проведем луч преломленной волны, он перпендикулярен фронту преломленной волны. Назовем углом преломления угол, образованный преломленным лучом и перпендикуляром, восставленным в точке падения луча и продолженным во вторую среду.

Выражая из прямоугольных треугольников ABC и ABD общую гипотенузу, получим закон преломления: отношение синуса угла падения луча к синусу угла преломления равно отношению скорости

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}=n,$$

n — показатель преломления второй среды относительно первой.



Если угол падения луча на границу раздела двух сред равен нулю, то волна не испытывает преломления.

Основные свойства волн

1. В однородной среде волна распространяется прямолинейно.

2. Закон прямолинейного распространения волн нарушается, если волна падает на границу раздела двух сред под углом, отличным от нуля.

3. При падении на границу раздела двух сред волна испытывает отражение:

а) угол отражения равен углу падения,

$$\gamma=\alpha;$$

б) луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

4. При падении на границу раздела двух сред волна испытывает преломление:

а) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред. Оно равно отношению скорости волны в первой среде к скорости волны во второй среде :

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}=n,$$

б) луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости;

5. Частота волны не меняется при отражении или при переходе волны из одной среды в другую.

6. При явлениях отражения и преломления волн форма волновых поверхностей не меняется: плоская волна остается плоской, а сферическая — сферической.

волны в первой среде к скорости волны во второй среде.

А так как скорость волны в данной среде есть величина постоянная, то и отношение этих скоростей для данной пары сред является постоянной величиной. Это отношение называют показателем преломления второй среды относительно первой.

Показатель преломления не зависит от угла падения луча, он зависит только от скоростей волн в данных средах.

Из построения видно, что падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр, восставленный в точке падения луча лежат в одной плоскости.

Думаю, вы обратили внимание, что при преломлении плоской волны, форма фронта волны не изменилась: во второй среде также распространяется плоская волна. Вы также заметили, что в зависимости от соотношения скоростей волн в средах, могут наблюдаться два случая. Первый — когда скорость волн во второй среде больше скорости волн в первой, в этом случае угол преломления больше угла падения. Преломленный луч отклоняется от перпендикуляра.

Второй случай, когда скорость волн во второй среде меньше скорости в первой среде. В этом случае угол преломления меньше угла падения и преломленный луч отклоняется к перпендикуляру.

Подводя итоги сказанному, еще раз подчеркнем самое главное.

В однородной среде волны распространяются прямолинейно.

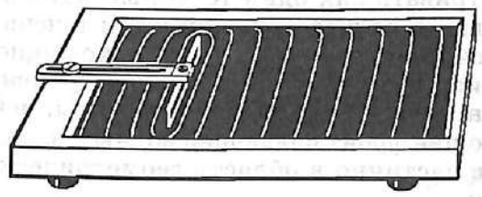
Если на своем пути они встречают преграду, закон прямолинейного распространения нарушается. На границе раздела двух сред волны обнаруживают свойства отражения и преломления.

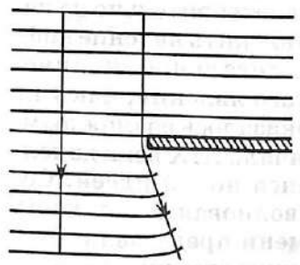
При отражении и преломлении волн форма волновых поверхностей не меняется: плоская волна остается плоской, а сферическая — сферической. В данных явлениях выполняются законы отражения и преломления волн, сформулированные в отношении углов падения, отражения и преломления лучей падающей, отраженной и преломленной волн.

Явление преломления волн обусловлено изменением скорости распространения волны при переходе из одной среды в другую. При этом частота волны остается неизменной, а длина волны изменяется вместе со скоростью.

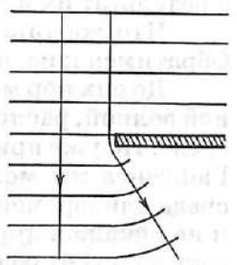
§ 6. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛН. ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Волны на воде по-разному огибают камни больших и малых размеров

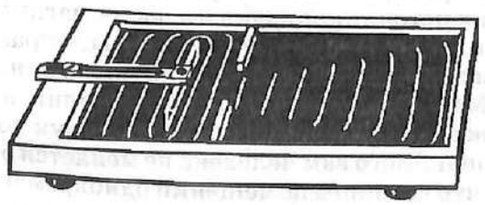




Вблизи края стенки, на которую падает плоская волна, можно обнаружить, что волна заходит в область геометрической тени.



При увеличении длины волны отклонение от прямолинейного распространения вблизи краев преграды увеличивается.



Рассматривая отражение волн, мы предполагали, что размеры отражающей поверхности очень велики. Однако в реальных ситуациях на пути волны могут появляться преграды разных размеров. Исследования показывают, что в таких случаях поведение волны определяется, в основном, соотношением между длиной волны и размерами преграды.

Волны способны огибать преграды. Это явление получило название **дифракции** волн. Оно означает, что при распространении волны снова наблюдается отклонение от прямолинейного распространения.

Для изучения дифракции механических волн удобно использовать волновую ванну и протяженный источник плоских волн. На пути волны можно помещать преграды разных размеров или расположить экран с отверстием, размеры которого можно менять, и проводить наблюдения за волной. Как обычно, в исследовании нужно придерживаться определенной последовательности действий. Например, постепенно уменьшать размеры препятствия или размеры отверстия в экране.

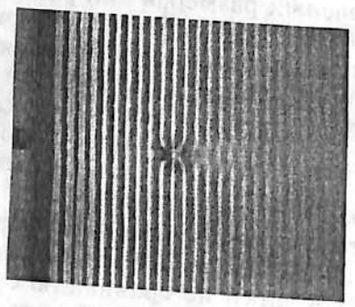
В таком случае легко обнаруживается следующий факт: за преградами, размеры которых велики по сравнению с длиной волны, образуется **тень** — область, в которую волна не проникает. Однако и в этих случаях можно заметить краевые эффекты: волна частично проникает в область геометрической тени, образованной теми лучами волны, которые проходят через крайние точки предмета. Это означает, что на границах происходит изменение формы волновых поверхностей, они искривляются.

По мере уменьшения размеров преграды не только уменьшается область тени, но и усиливаются краевые эффекты. Наконец, когда размеры преграды примерно равны длине волны или меньше ее, волна распространяется так, как если бы преграды и не было вовсе.

Те же эффекты наблюдаются и при прохождении волны через отверстие в экране. Когда размеры отверстия велики по сравнению с длиной волны, она беспрепятственно проходит через него, немного загибаясь в область геометрической тени экрана.

По мере уменьшения размеров отверстия проникновение волны в область геометрической тени усиливается, а когда раз-

Проходя через отверстие в экране, волна заходит в область геометрической тени тем сильнее, чем больше длина волны



меры отверстия становятся меньше длины волны, форма волновых поверхностей становится сферической!

При дальнейшем уменьшении размеров отверстия в экране волна за экраном ослабевает (это понятно, так как уменьшается энергия прошедшей сквозь отверстие волны), но становится все более сферической. При этом само отверстие как бы становится точечным источником волны.

Явление дифракции нетрудно объяснить на основе принципа Гюйгенса.

Вторичные источники в узкой щели располагаются в такой малой области пространства, что фактически их можно рассматривать как один точечный источник волны. В случае широкой щели точечные источники вторичных волн, находящиеся вблизи границ области распространения волн, создают сферические фронты, искажающие фронт падающей волны и заходящие частично в область геометрической тени.

Таким образом, принцип Гюйгенса позволяет вполне удовлетворительно на качественном уровне объяснить явление дифракции волн. Более детальное количественное описание этого явления, как уже было сказано выше, оказалось возможным, когда О. Френель в начале XIX века дополнил принцип Гюйгенса новой идеей. Согласно идее Френеля волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции.

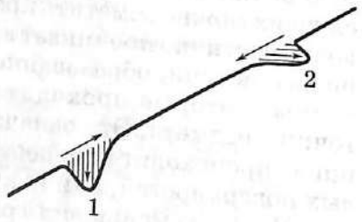
Что же такое интерференция волн? Обратимся к изучению этого явления.

До сих пор мы имели дело только с одной волной, распространяющейся в данной среде. Но уже при рассмотрении принципа Гюйгенса мы молчаливо полагали, что в среде одновременно, не мешая друг другу и не искажая друг друга, могут существовать волны от разных источников.

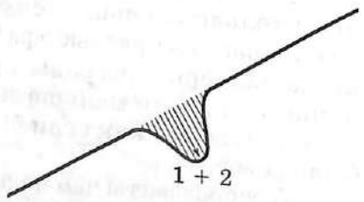
С такой ситуацией мы сталкиваемся довольно часто, ведь одновременно в воздухе распространяются звуковые волны от многих источников звука и электромагнитные, в том числе и световые волны, от разных источников электромагнитных волн.

Мы по опыту знаем, что эти волны не искажают друг друга. Например, звук голоса знакомого вам человека не меняется от того, что в данном помещении одновременно говорят многие другие люди. Другое дело ваше ухо! Оно реагирует на все звуко-

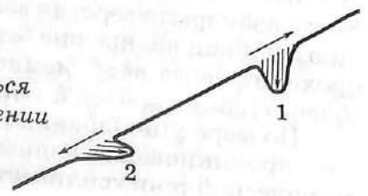
Волны бегут навстречу друг другу

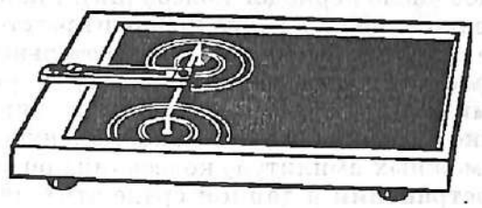


В этом месте пространства происходит наложение волн

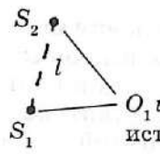


Каждая волна продолжает распространяться в своем направлении

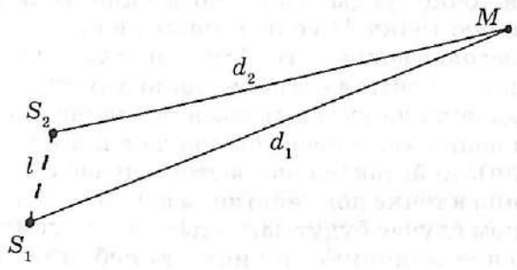


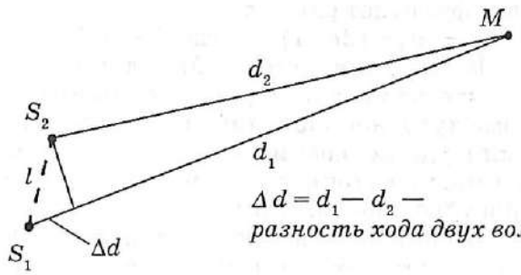


Произвольная точка пространства — M

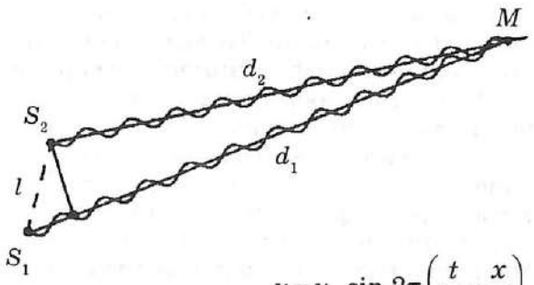


O_1 и O_2 — точечные источники волн





$\Delta d = d_1 - d_2$ — *разность хода двух волн*



$$y = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

$t \rightarrow t+T$

$x \rightarrow x+\lambda$

вые волны, достигающие в данный момент барабанной перепонки.

Это означает, что волны, испущенные разными источниками, сохраняют свою индивидуальность (частоту, амплитуду, энергию и пр.), но результат их одновременного воздействия на данную частицу среды оказывается зависящим от того, в какой фазе «пришли» разные волны в эту точку пространства и какова их амплитуда.

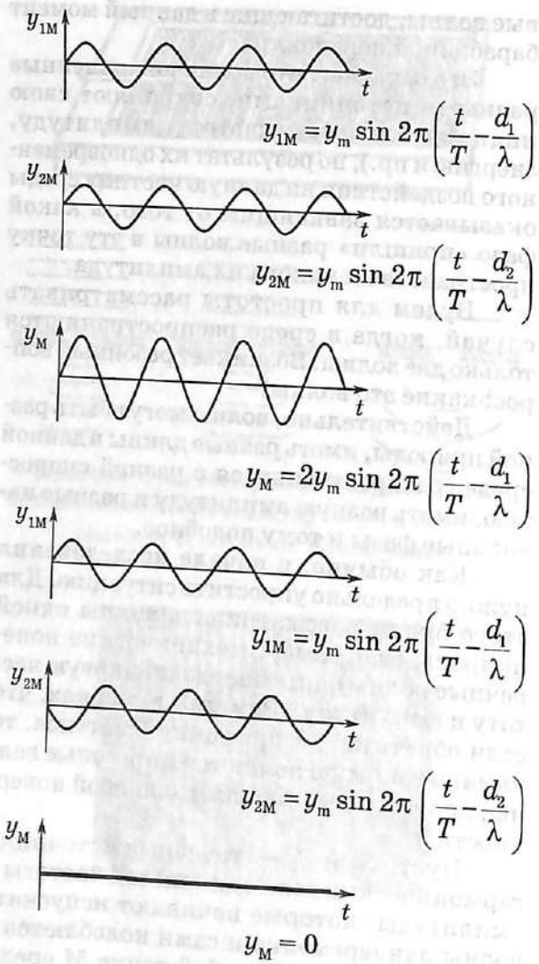
Будем для простоты рассматривать случай, когда в среде распространяются только две волны. Возникает резонный вопрос: какие это волны?

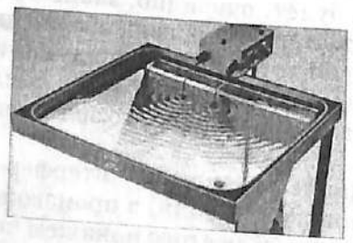
Действительно, волны могут быть разной природы, иметь разные длины в данной среде, распространяться с разной скоростью, иметь разную амплитуду и разные начальные фазы и тому подобное.

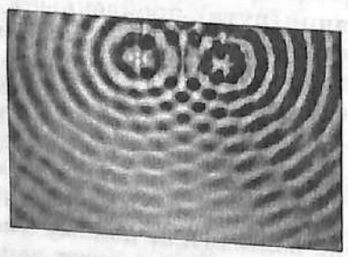
Как обычно, в начале исследования нужно предельно упростить ситуацию. Для этого будем рассматривать волны одной природы (например, механические поперечные волны), имеющие одинаковую частоту и амплитуду. (Заметим в скобках, что если обратиться к принципу Гюйгенса, то именно такими и являются вторичные волны, испускаемые точками волновой поверхности.)

Пусть S_1 и S_2 — точечные источники гармонических волн одинаковой частоты и амплитуды, которые начинают испускать волны одновременно и сами колеблются в одинаковой фазе. В любой точке M среды будут складываться колебания, вызванные этими двумя источниками. Результат сложения будет, очевидно, зависеть от разности фаз. Например, если обе волны придут в точку M горбами или впадинами, то произойдет усиление колебаний, а если волны придут в противофазе, то ослабление колебаний.

Найдем результат интерференции (то есть наложения волн) в произвольной точке M среды. Для этого покажем на рисунке расстояния (пути), пройденные волнами от этих источников до данной точки: d_1 и d_2. Если расстояние l между источниками мало по сравнению с d_1 и d_2 (то есть $l \ll d_1$ и $l \ll d_2$), то амплитуды обеих волн в точке M можно считать практически одинаковыми. Тогда **разность хода** двух волн в точке M составит $\Delta d = d_1 - d_2$. Если разность хода равна длине волны (или целому числу длин волн), то первая волна будет запаздывать относительно второй на один период (или







целое число периодов колебаний), так как именно за период волна проходит расстояние равное длине волны. Следовательно, в этом случае волны придут в точку M гребнями (или впадинами), то есть в данной точке будем наблюдать максимальную из возможных амплитуду колебаний при распространении в данной среде этих двух волн.

В таком случае говорят: в точке M наблюдается максимум интерференции. Значит, математически **условие максимумов интерференции** в точке можно записать так: $\Delta d = d_1 - d_2 = k\lambda$, где k — целое число, $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Аналогично определим условия **минимумов интерференции**. Думаю вы поняли, что под минимумом интерференции понимается «колебание с нулевой амплитудой» или иначе — отсутствие колебаний в данной точке среды. Такое возможно, если в данную точку M волны придут в противофазе: одна волна — горбом, а другая — впадиной. Чтобы такое произошло, в разности хода должна укладываться половина длины волны (или нечетное число длин полуволн). Действительно, в этом случае колебания в точке под действием одной волны в таком случае будут запаздывать на время, равное половине периода колебаний, а сдвиг фаз будет равен π:

$\Delta d = d_1 - d_2 = (2k+1)\lambda/2$, где $k = 0, 1, 2, \ldots$

Если в данную точку M волны придут так, что разность хода будет принимать промежуточное значение между λ и $\lambda/2$, то амплитуда колебаний в ней будет принимать промежуточное значение между нулевой и удвоенной амплитудой.

Но наиболее важным является условие, при котором это распределение амплитуд колебаний в пространстве остается неизменным во времени. Тогда мы наблюдаем устойчивую **интерференционную картину**.

Нетрудно сообразить, что таким условием является не только совпадение частот и амплитуд колебаний в волнах, но и совпадение фаз (или в более общем случае, постоянство сдвига фаз в колебаниях источников). Такие источники волн и созданные ими волны называются **когерентными**.

Только при сложении когерентных волн в пространстве наблюдается устойчивая во времени картина наложения волн — интерференционная картина.

Вы, конечно, понимаете, что когерентные источники — это физическая модель.

Две волны
называются когерентными, если:

— имеют одинаковую частоту;

— фазы их колебаний отличаются на постоянную, не зависящую от времени величину.

Интерференция

1. Явление наложения волн, распространяющихся в одной и той же среде.

2. Устойчивая картина интерференции наблюдается при наложении когерентных волн.

3. Если колебания источнков происходят в одинаковой фазе, то условие максимумов интерференции:*

$$\Delta d = d_1 - d_2 = k\lambda,$$
где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

4. Условие минимумов интерференции (при тех же условиях):

$$\Delta d = d_1 - d_2 = (2k+1)\,\lambda/2,$$
где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

5. Амплитуда колебаний в остальных точках среды тоже остается постоянной во времени и принимает промежуточные значения от нуля до удвоенной амплитуды волны.

6. В результате интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве.

Дифракция

1. Явление огибания волной преграды.

2. Наблюдается при взаимодействии волны с любыми телами, находящимися в той среде, где распространяется волна.

3. Условия наблюдения:

а) если размеры преграды (отверстия) сравнимы с длиной волны, то дифракцию можно наблюдать в непосредственной близости от преграды (отверстия);

б) если размеры преграды (отверстия) велики по сравнению с длиной волны, то отчетливо обнаружить дифракцию можно только на больших расстояниях от преграды (отверстия).

* В дальнейшем, если это не оговорено специально, при решении задач будем считать, что колебания источников происходят в одинаковой фазе

Создание реальных источников, приближающихся по своим свойствам к когерентным источникам, — дело непростое. Однако, высокие производственные технологии позволяют сегодня создавать очень близкие к когерентным источники звука и квантовые (оптические) генераторы света — лазеры.

С энергетической точки зрения процесс интерференции когерентных волн представляет собой процесс перераспределения энергии в пространстве, при которой в некоторых точках (максимумах интерференции) энергия концентрируется за счет того, что в другие точки (минимумы интерференции) она вовсе не поступает.

Если снова обратиться к принципу Гюйгенса, то следует предположить, что источники вторичных волн — когерентные источники, именно поэтому результат наложения их волн дает вполне определенную интерференционную картину. Ее можно рассчитать и предсказать поведение волны в самых разных ситуациях.

Наконец, в завершение параграфа, следует заметить, что явления дифракции и интерференции — это явления, присущие только волновым процессам. При этом природа волн несущественна.

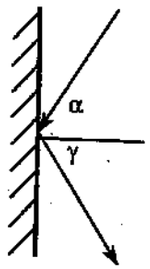
Сегодня, как уже было сказано, можно наблюдать интерференцию звуковых волн, используя современные акустические системы. При помощи лазеров даже в кабинете физики можно продемонстрировать интерференцию света. Интерференцию волн на поверхности воды в волновой ванне можно наблюдать в течение сравнительно небольших промежутков времени при помощи даже сравнительно примитивных вибраторов.

Важно для нас то, что в тех случаях, когда нужно установить, является ли изучаемый феномен волновым процессом, обычно прибегают к поиску явлений дифракции или интерференции.

Обнаружение этих явлений позволяет однозначно отнести изучаемый объект к числу волновых.

В частности, в опытах по обнаружению электромагнитных волн и изучению их свойств явления интерференции и дифракции помогли определить основные параметры волн. Огромную роль сыграли эти явления при исследовании свойств света и установлении его электромагнитной природы. А сегодня ученые исследуют уже волновые свойства элементарных частиц.

§ 7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ О СВОЙСТВАХ ВОЛН



$\alpha+\gamma=\varphi$; $\varphi=110^\circ$

$\alpha=\gamma$;

$2\alpha=\varphi$; $\alpha=\frac{\varphi}{2}$;

$\alpha=\frac{110^\circ}{2}=55^\circ$

Задача 1. Плоская волна падает на вертикальную стенку и отражается от нее. Чему равен угол отражения, если падающий луч образует с отраженным лучом угол 110°?

Решение этой несложной задачи станет очевидным, если изобразить ход лучей в описанной ситуации, и воспользоваться определением угла падения и угла отражения. Форма записи задачи в этом случае может быть произвольной.

Задача 2. Плоская механическая волна падает на границу раздела двух несмешивающихся жидкостей под углом 30°. Скорость распространения волны в одной среде равна 1500 м/с, в другой 1900 м/с. Найти угол преломления луча.

Перед тем, как записать уравнение закона преломления волн, нужно ответить на вопрос: из какой среды в какую переходит волна? Поскольку в условии задачи об этом явно не говорится, нужно рассмотреть обе ситуации.

1-ая ситуация: волна переходит из среды, в которой ее скорость равна 1500 м/с.

2 - ая ситуация: волна падает на границу раздела из среды, в которой ее скорость равна 1900 м/с.

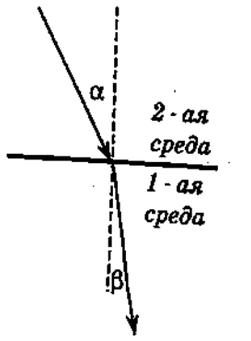
Изобразим ход луча в каждом случае, покажем на чертеже углы падения и преломления. Обратите внимание, когда скорость волны при переходе из одной среды в другую уменьшается, луч отклоняется к перпендикуляру. Когда скорость увеличивается, луч отклоняется от перпендикуляра.

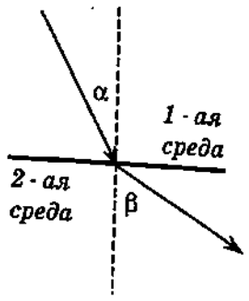
Теперь запишем для каждого случая закон преломления волны и выразим из него неизвестную величину. Обратите внимание на индексы в обозначении скорости: в законе преломления они связаны с порядком следования луча.

Для нахождения угла преломления (после того, как найден синус этого угла) нужно воспользоваться таблицами соответствующих значений.

Дано:
$\alpha = 30^\circ$
$v_1 = 1500$ м/с
$v_2 = 1900$ м/с
β — ?

Возможны две ситуации:
из 1 среды во 2 среду
из 2 среды в 1 среду





$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}$ — закон преломления

$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_2}{v_1}$

$\sin\beta=\sin\alpha\cdot\frac{v_1}{v_2}$

$\sin\beta=\sin 30^0\cdot\frac{1500}{1900}=$

$=\frac{0{,}5\cdot 1500}{1900}=0{,}395;$

$\beta=23^\circ$

$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}$

$\sin\beta=\sin\alpha\cdot\frac{v_2}{v_1}$

$\sin\beta=\sin 30^0\cdot\frac{1900}{1500}=$

$=\frac{0{,}5\cdot 1900}{1500}=0{,}633;$

$\beta=39^\circ$

Дано:
$\nu_1=\nu_2$, $y_{m1}=y_{m2}$, $\varphi_1-\varphi_2=0$,
источники волн когерентные.
M ($d_1=2$ м, $d_2=2{,}5$ м),
минимум интерференции.
$v=340$ м/с
ν — ?

Решение:

1. Условие минимумов интерференции в точке M:

$$\Delta d=(2k+1)\cdot\frac{\lambda}{2},\quad k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots$$

$$\lambda=\frac{2\Delta d}{2k+1},\quad k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots$$

2. $\lambda=v\cdot T=v\cdot\frac{1}{\nu}$; $\nu=\frac{v}{\lambda}$;

$\nu_0=\frac{v}{\lambda_0}=\frac{v}{2\Delta d}$ — минимальная частота;

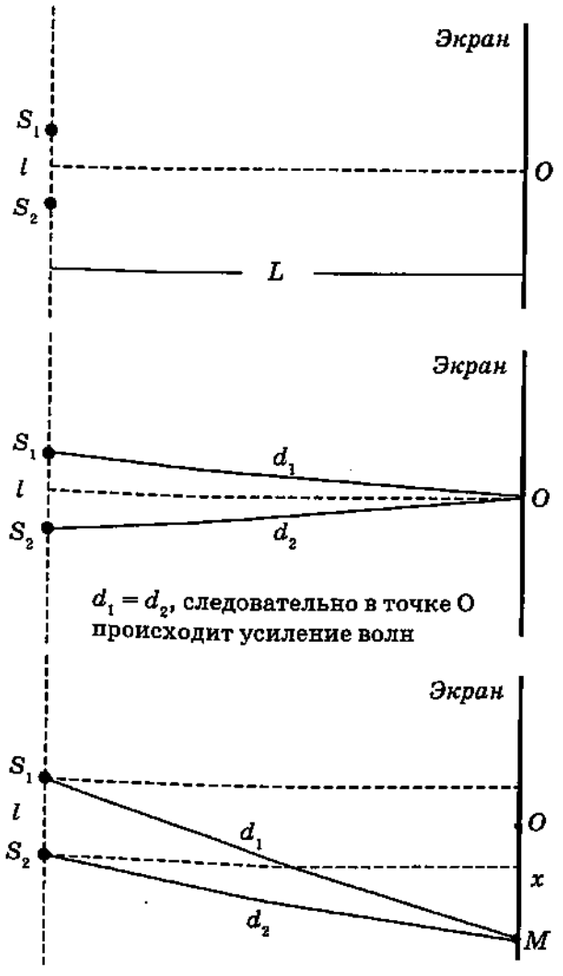
$\nu_1=\frac{v}{\lambda_1}=\frac{3v}{2\Delta d}$; $\nu_2=\frac{v}{\lambda_2}=\frac{5v}{2\Delta d}$;...

$\nu_k=\frac{v}{\lambda_k}=\frac{(2k+1)\,v}{2\Delta d}$, где $k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots$

3. Вычисления:

$\nu_0=\frac{340\text{ м/с}}{2\cdot 0{,}5\text{ м}}=340$ Гц;

$\nu_k=(2k+1)\cdot\nu_0$, где $k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots$



В данном случае речь идет о распространении в однородной среде (воздухе) двух когерентных волн (в тексте задачи указано, что частота, амплитуда и фаза колебаний источников одинаковы).

Следовательно, в данной точке пространства происходит наложение волн, в результате которого амплитуда колебаний в точке равна нулю (звук не слышен).

Это возможно, когда в разности хода двух когерентных волн укладывается нечетное число длин полуволн.

Записывая условие минимумов интерференции и решая уравнение относительно неизвестного значения длины волны, найдем **спектр значений** (то есть последовательность значений) длин волн, при которых звук в данной точке не слышен.

По известной скорости и найденным значениям длин волн рассчитаем значения возможных частот. Значение минимальной частоты укажем в явном виде.

Задача 4. В однородной изотропной среде находятся два когерентных точечных источника волн длиной λ, колеблющихся в одинаковой фазе. Расстояние между источниками $l << \lambda$. Результат интерференции волн наблюдается в точках, расположенных на прямой (или экране), параллельной линии, проходящей через оба источника, и лежащей в плоскости, в которой находятся обе прямые. Опишите качественно и количественно наблюдаемую интерференционную картину.

Характерными точками интерференционной картины являются точки максимумов и минимумов интерференции.

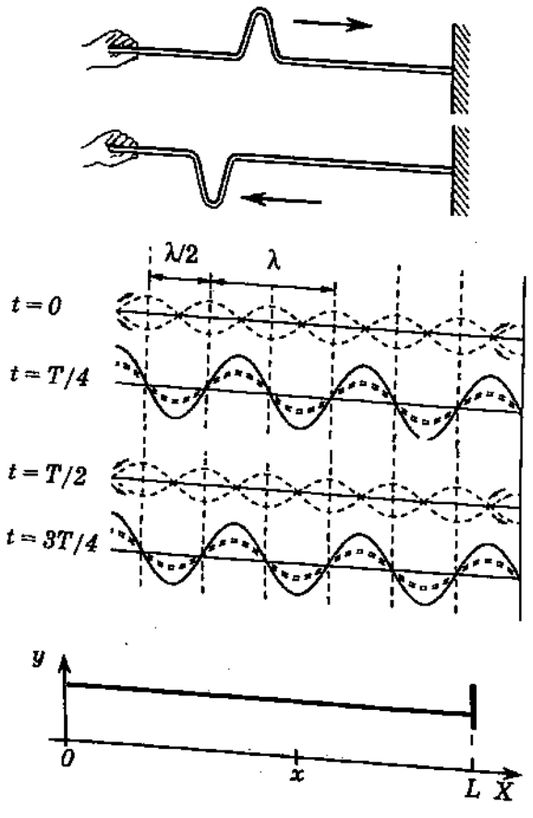
Поэтому описывая интерференционную картину, нужно указать, в каких точках рассматриваемой прямой наблюдается усиление колебаний, а в каких — ослабление.

Выполним построение. Обозначим расстояние между экраном и линией, на которой лежат источники, буквой L.

Нетрудно сообразить, что интерференционная картина будет симметричной относительно точки, лежащей на пересечении экрана со срединным перпендикуляром к отрезку, соединяющему источники волн. В этой точке (будем называть ее центром экрана) будет наблюдаться максимум интерференции «нулевого порядка», то есть соответствующий значению $k = 0$ условия максимумов интерференции.

Решение:

1. Пусть в (•) M наблюдается максимум интерференции k-го порядка, тогда
$$\Delta d = k\lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2, \ldots$$
2. Найдем разность хода двух волн
$$\Delta d = d_1 - d_2;$$
$$d_1^2 = L^2 + (x + \frac{l}{2})^2 - \text{ из } \Delta\, AMS_1;$$
$$d_2^2 = L^2 + (x - \frac{l}{2})^2 - \text{ из } \Delta\, BMS_2;$$
3. Воспользуемся формулой сокращенного умножения $d_1^2 - d_2^2 = (d_1 - d_2)(d_1 + d_2)$
$$d_1^2 - d_2^2 = (x + \frac{l}{2})^2 - (x - \frac{l}{2})^2 = 2 \cdot \frac{l}{2} \cdot 2x = 2xl;$$
$$d_1^2 - d_2^2 = (d_1 - d_2)(d_1 + d_2) \approx \Delta d \cdot 2L,$$
так как $l \ll L$ и $OM \approx l$.
4. $\Delta d \cdot 2L = 2xl;$
$$x = \frac{\Delta d \cdot L}{l}; \qquad x_{k,\,max} = \frac{\Delta d_k \cdot L}{l} = \frac{k\lambda L}{l}$$
5. Для минимумов интерференции
$$x_{k,\,min} = \frac{\Delta d_k \cdot L}{l} = \frac{(2k+1)\lambda L}{2l}$$



Действительно, эта точка расположена симметрично по отношению к источникам волн и разность хода волн в ней равна нулю. Слева и справа от нее будут располагаться максимумы соответственно первого, второго и т.д. порядков, а между ними — минимумы интерференции.

Расчет расстояний от источников волн до соответствующих точек на экране потребует обращения к геометрическим соотношениям в прямоугольных треугольниках.

Положение k -го максимума интерференционной картины таково, что разность хода двух волн до этой точки равно $k\lambda$. Выражая расстояния от этой точки экрана до каждого источника, находя разность хода волн и приравнивая ее $k\lambda$, получим уравнение, позволяющее найти положение этого максимума интерференции по отношению к центру экрана.

Аналогично можно рассчитать положения минимумов интерференции.

Мы приводим лишь окончательный результат, опуская промежуточные выкладки, так как они полностью повторяют только что представленные.

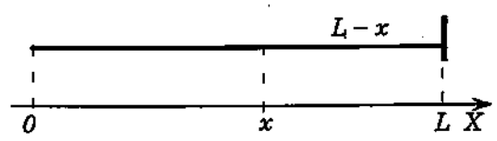
Задача 5. Один конец резинового шнура привязан к жесткой стенке, а другой совершает колебания. При некоторой частоте колебаний в шнуре возникает стоячая волна, то есть все точки шнура начинают совершать колебания с разными, но постоянными во времени амплитудами.

Амплитуда колебаний точек шнура лежит в интервале от 0 (узел волны) до некоторого максимального значения (пучность волны). При какой частоте в шнуре возникает стоячая волна, если скорость распространения волн в шнуре равна v ?

Вероятно, вы догадались, что в данном случае мы имеем дело с интерференционной картиной, наблюдаемой в шнуре в результате наложения падающей и отраженной от стенки волн. Будем считать, что колебания в шнуре происходят с частотой ν, что они практически не затухают при распространении, и при отражении от стенки потерь энергии также не происходит.

Запишем уравнение бегущей волны для падающей и отраженной волн. Для этого выберем систему отсчета, расположив ее начало у свободного конца шнура и направив ось OX в направлении падающей волны. Обозначим длину шнура L.

1. Уравнение бегущей (падающей) волны:
$$y = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$



2. Найдем фазу отраженной волны к моменту времени t, когда отраженная волна достигнет точки с координатой x.

а) В момент времени, когда отраженная волна дойдет до точки с координатой x, волновое движение от источника распространится на расстояние $L + (L - x) = 2L - x$, значит фаза волны за счет запаздывания будет равна:
$$\omega \left(t - \frac{2L - x}{v} \right)$$

б) Так как точка с координатой L закреплена, то падающая и отраженная волна в ней всегда должны давать в сумме смещение, равное нулю, то
$$y_{пад} = y_{m,\,пад} \sin \omega \left(t - \frac{L}{v} \right);$$
$$y_{отр} = y_{m,\,отр} \sin \omega \left(t - \frac{2L - L}{v} \right) =$$
$$= y_{m,\,отр} \sin \omega \left(t - \frac{L}{v} \right);$$
то есть $y_{пад} + y_{отр} = 0$ или $y_{отр} = -y_{пад}$.
Следовательно,
$$y_{отр} = -y_m \sin \omega \left(t - \frac{2L - x}{v} \right).$$

3. Найдем результат наложения падающей и отраженной волн в некоторой точке $M(x)$:
$$y_{пад} + y_{отр} = y_m \left[\sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) - \sin \omega \left(t - \frac{2L - x}{v} \right) \right] =$$
$$= 2y_m \sin \frac{\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) - \omega \left(t - \frac{2L - x}{v} \right)}{2} \cdot \cos \frac{\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \omega \left(t - \frac{2L - x}{v} \right)}{2} =$$
$$= 2y_m \sin \frac{\omega(L - x)}{v} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{L}{v} \right).$$
$$y_{ст} = 2y_m \sin \frac{\omega(L - x)}{v} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{L}{v} \right).$$

Уравнение падающей волны записать нетрудно: это знакомое вам уравнение обычной бегущей волны. Чтобы записать уравнение бегущей отраженной волны, перечислим ее параметры. Амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей, так как потерь энергии не происходит. Частота отраженной волны равна частоте падающей. Найти расстояние, пройденное волной от источника до данной точки шнура в отраженной волне, также несложно. Если вы внимательно рассмотрите рисунок, то заметите, что падающая волна дошла до конца шнура (расстояние L), а затем от стенки до данной точки расстояние $(L - x)$, то есть всего: $(L + L - x) = 2L - x$.

Это расстояние определяет запаздывание колебаний в данной точке отраженной волны по отношению к источнику волн, то есть отставание, связанное только с тем, что точка находится на некотором расстоянии от источника. Но при отражении волны от твердой стенки происходит дополнительное изменение фазы волны сразу на π.

Действительно, в том месте, где происходит отражение волны (закрепленный конец!) амплитуда колебаний равна нулю (всегда!). Это означает, что падающая и отраженная волна в этой точке всегда находятся в противофазе. Значит, при отражении от твердой стенки волна «теряет» половину длины волны.

Для нас это означает, что смещения в отраженной волне имеют противоположный знак по сравнению со смещениями в падающей волне. Этот факт вы могли обнаружить, когда наблюдали движение одиночного импульса вдоль шнура, один конец которого закреплен у стенки.

Теперь можно найти результат наложения волн. Для этого сложим смещения, вызванные в некоторой произвольной точке шнура падающей и отраженной волнами и воспользуемся теоремой о разности синусов. Мы получили уравнение стоячей волны. Проанализируем его.

В полученном уравнении можно обнаружить периодичность движения во времени и периодичность в пространстве. Однако, теперь временная и пространственная координаты входят в аргументы разных тригонометрических функций. Колебания точек шнура происходят во времени по закону косинуса, а смещение точки шнура в данный момент времени зависит от ее положения на шнуре. При этом амплитуда ко-

3. Проведем анализ уравнения:

$y_{ст}(t) = y_0 \cos\omega\left(t - \frac{L}{\upsilon}\right)$ – точки шнура совершают гармонические колебания;

$y_0 = 2y_m \sin\frac{\omega(L-x)}{\upsilon}$ – амплитуда колебаний точки шнура зависит от ее положения.

$y_{0m} = 2y_m \cdot \left|\sin\frac{\omega(L-x)}{\upsilon}\right|_m = 2y_m$

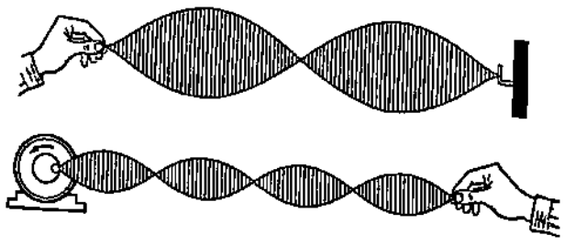
$y_0 = 0$, при $x = L$ – узел волны.

Следущий узел находится в точке шнура x, причем $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$, то есть:

$\frac{\omega(L-x)}{\upsilon} - 0 = \pi$ или $x = L - \frac{\lambda}{2}$.

Вообще, в точках, в одной из которых находится узел и для которых выполняется $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$, также находятся узлы стоячей волны.

Аналогично, между соседними пучностями расстояние равно половине длины волны.



4. Если концы шнура закреплены, то условие образования стоячей волны:

$y|_{x=0} = y|_{x=L} = 0$, значит $L = k\cdot\frac{\lambda}{2}$, где $k = 1, 2, \ldots$; следовательно в шнуре длиной L могут возникать стоячие волны следующих длин и частот:

$\lambda_k = \frac{2L}{k}$ или $\frac{\upsilon}{\nu_k} = \frac{2L}{k}$; $\nu_k = \frac{k\upsilon}{2L}$.

Таким образом, у шнура длиной L имеется такой набор собственных частот колебаний:

$\nu_1 = \frac{\upsilon}{2L}$; $\nu_2 = \frac{2\upsilon}{2L} = \frac{\upsilon}{L}$; $\nu_3 = \frac{3\upsilon}{2L}$; $\ldots$

лебания у точек, расположенных в разных местах шнура не одинакова. Она зависит от положения точки на шнуре, от частоты колебаний и скорости распространения волны и не зависит от времени.

Следовательно, имеет место устойчивая во времени динамическая картина распределения амплитуды колебаний в разных точках шнура — интерференционная картина.

Найдем положения узлов стоячей волны, то есть точек, амплитуда колебания которых равна нулю. Несложные преобразования показывают, что они располагаются на расстояниях, равных половине длины бегущей волны. Посередине между ними находятся пучности стоячей волны. Эти точки колеблются с удвоенной амплитудой.

Особенностью такой волны является то, что фаза колебания точек, расположенных между узлами стоячей волны, одинакова. Это означает, что в данный момент времени все точки шнура, расположенные между узлами движутся в одном направлении. Но при переходе через узел фаза меняется на π и направление смещения точек шнура (лежащих между следующими соседними узлами) меняется на противоположное.

Так как потерь энергии в стоячей волне не происходит, то возникнув в шнуре, она (в идеальном случае!) будет существовать сколь угодно долго. Ваша рука, приводящая в движение незакрепленный конец шнура, просто должна будет удерживать этот конец после того, как колебания в шнуре установились. Поэтому стоячую волну можно рассматривать как свободное колебание протяженного объекта (шнура, струны и т.п.). В этом случае можно подсчитать собственные частоты колебаний этих тел, в нашем случае шнура длиной L.

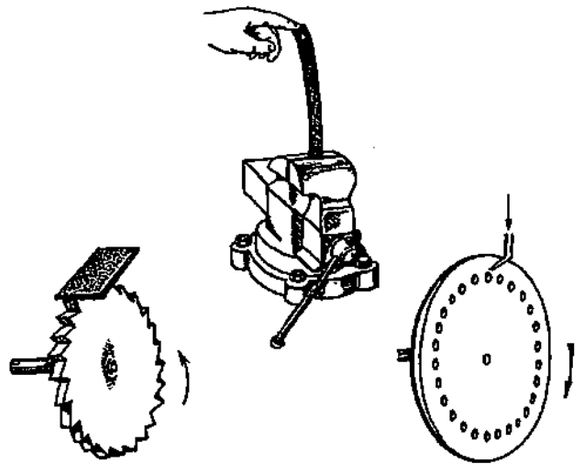
Действительно, на концах шнура образуются узлы, а в промежутке между ними может располагаться пучность, или еще один, два и т.д. узлов, важно только, чтобы на длине шнура укладывалось целое число длин стоячих волн. А так как длина стоячей волны равна половине длины бегущей волны такой же частоты, получаем соотношение для собственных частот колебаний шнура. Наименьшая из них называется основным тоном, все остальные — кратные ей, называются обертонами. В явлении резонанса шнур или струна откликаются на любую из набора собственных частот.

§ 8. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ И ИХ СВОЙСТВА

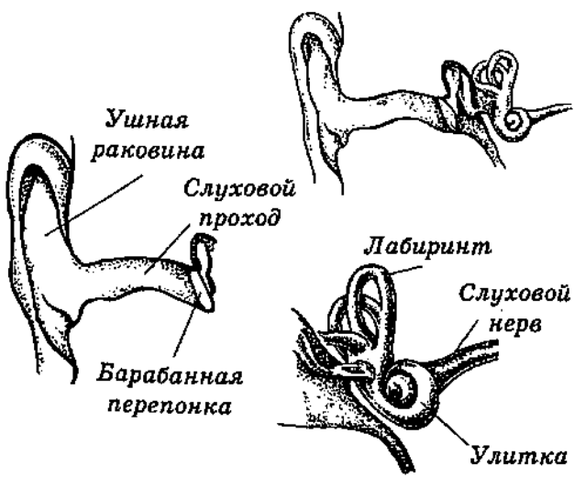
Звуковые волны

1. Механические волны, частота которых лежит в диапазоне от 20 Гц до 20 000 Гц.
2. Распространяются в жидких, твердых, газообразных средах с конечной скоростью.
3. При распространении обнаруживают общие для волновых процессов свойства: отражение, преломление, дифракцию, интерференцию.
4. При взаимодействии с телами передают им свою энергию (или часть энергии) — поглощаются.

Источники звука —
любые колеблющиеся со звуковой частотой тела (жидкие, твердые, газообразные)



Приемники звука —
любые тела, способные колебаться под действием звуковой волны (обычно, мембраны микрофонов, барабанная перепонка уха человека и животных)



Звуковые волны вы подробно изучали в основной школе. Поэтому мы кратко повторим некоторые сведения о них.

Вам известно, что человеческое ухо воспринимает в качестве звука механические колебания, частота которых лежит в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Такие колебания называют акустическими, а наука, изучающая звук, называется акустикой.

Любое тело — жидкое, твердое или газообразное, колеблющееся со звуковой частотой, создает в окружающей среде звуковую волну. Такой средой обычно бывает воздух. Конечно, воздух не имеет специальных преимуществ перед другими средами в смысле возможности распространения звука. Звук прекрасно распространяется в воде и твердых телах, при этом со значительно большей скоростью, чем в воздухе. Хорошо проводит звук земля.

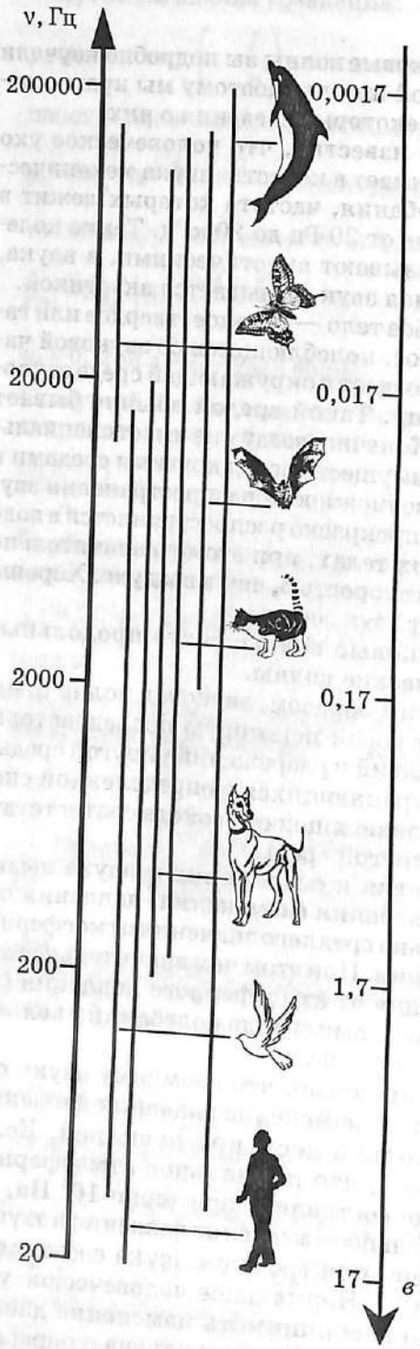
Звуковые волны — это продольные механические волны.

Таким образом, звуковая волна представляет собой некоторую последовательность сжатий и разрежений упругой среды, распространяющихся с определенной скоростью, зависящей от свойств соответствующей упругой среды.

Сжатия и разрежения воздуха вызывают колебания (изменения) давления относительно среднего значения атмосферного давления. При этом чем значительнее это отклонение от атмосферного давления (то есть больше амплитуда колебаний в волне), тем «громче» звук.

Установлено, что громкому звуку соответствует изменение значения давления на несколько десятков паскалей. Если вспомнить, что нормальное атмосферное давление составляет примерно 10^5 Па, то относительное изменение давления в звуковой волне при громком звуке составляет менее 10^{-3}. Нормальное человеческое ухо способно воспринимать изменение давления до 10^{-5} Па. В таком случае к барабанной перепонке уха подводится мощность, составляющая примерно 10^{-16} Вт. Вот какое чувствительное устройство наше ухо!

Вы, конечно, понимаете, что измерить перепады давления в звуковой волне довольно трудно. Обычно это делают, преобразуя звуки при помощи микрофона в электрические колебания, а затем по амплитуде силы тока судят о величине колебаний давления.



$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

Температура воздуха, °С	Скорость звука, м/с	Температура воздуха, °С	Скорость звука, м/с
– 20	319	10	337
– 10	325	20	343
0	332	30	349

Скорость звука впервые была измерена в 1630 году М. Мерсенном, который по совету английского философа Ф. Бэкона провел наблюдение над выстрелом из мушкета. Расстояние между наблюдателем и мушкетом было поделено на время, прошедшее между вспышкой от выстрела и моментом, когда звук достиг наблюдателя. Мерсенн получил для скорости звука значение, равное 448 м/с.

Спустя полвека Ньютон вычислил скорость звука теоретически, исходя из упругих свойств воздуха, полагая, что процесс изменения давления в звуковой волне — изотермический и подчиняется закону Бойля-Мариотта. Вычисленная скорость оказалась чуть больше половины значения, полученного Мерсенном.

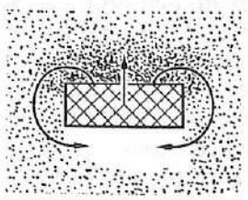
В 1738 году по решению Парижской академии наук опыты по измерению скорости звука были повторены. Полученный результат — 337 м/с — отличался от значения Мерсенна (этот факт объяснили тем, что измерения времени в XVII веке были несовершенными), но он по-прежнему сильно отличался от теоретических расчетов Ньютона.

В начале XIX века выяснилось, что теоретические расчеты Ньютона были ошибочными! Изменения давления в звуковой волне происходят так быстро, что его температура в местах сжатия значительно отличается от температуры в местах, где воздух разрежен.

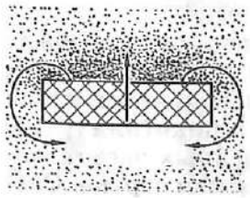
Если говорить на современном языке физики, то в звуковой волне происходят процессы адиабатного сжатия и разрежения воздуха. Эти процессы сопровождаются не только изменениями давления и плотности газа, но и изменениями его температуры. Французский ученый П. Лаплас, обнаруживший эту ошибку Ньютона, провел теоретические расчеты, которые были подвергнуты новой экспериментальной проверке. В этой проверке в 1822 году принимали участие Ж. Гей-Люссак, Д. Араго, А. Гумбольдт и другие видные ученые. Результаты опыта совпали с теоретическими вычислениями Лапласа. Они подтвердили также тот теоретический факт, что скорость звука зависит от температуры и увеличивается с ростом температуры.

Звуки разной частоты распространяются в воздухе с одинаковой скоростью. Если бы это было не так, мы не могли бы слышать, например, музыку в исполнении

Излучение звука



Если размеры источника малы по сравнению с длиной волны, то звуковая волна почти не излучается из-за «перетекания» воздуха с одной стороны источника в другую.



Интенсивная звуковая волна излучается, если размеры источника сравнимы с длиной волны. В этом случае выравнивания давления по обе стороны источника почти не происходит.

оркестра: звуки, созданные разными музыкальными инструментами, обгоняли бы друга друга, и вместо слаженного звучания мы слышали бы безобразный шум!

При распространении звука наблюдаются все закономерности, обнаруженные нами при изучении волн. Он способен отражаться от преград и огибать преграды, интерферировать с другими звуковыми волнами, проникать из одной среды в другую. При этом выполняется общее правило: при падении звука на границу раздела двух сред, плотности которых сильно отличаются (например, при переходе из воздуха в воду), значительная часть звуковой волны отражается от поверхности и лишь незначительная проникает внутрь другой среды. Этим объясняется тот факт, что в воде очень плохо слышны звуки, испущенные в воздухе на берегу.

Тонкие упругие стенки хорошо «пропускают» звук не потому, что он «проходит» их насквозь, а потому, что под воздействием звуковой волны они колеблются и приводят в волновое движение воздух с другой стороны практически с той же частотой, что и падающий на них звук.

Хорошие звукоизоляционные материалы устроены так, что содержат внутри себя воздух и большое количество отражающих поверхностей.

Попадая внутрь такого материала, звук испытывает многократные отражения, в результате чего практически полностью поглощается. Такими «поглощающими» поверхностями являются и капли влаги в тумане, поэтому в чистом воздухе один и тот же звук слышен лучше, чем в тумане.

Звуки различных частот по-разному поглощаются в разных средах, в том числе и в воздухе. Сильнее поглощаются звуки высоких частот, меньше — низких. По этой причине пароходные гудки и большие колокола, при помощи которых нужно было передать информацию на большие расстояния, издавна настраивают на низкий тон (не выше 50 Гц). Слабее всего затухают инфразвуки, способные распространяться, особенно в воде, на многие десятки и сотни километров.

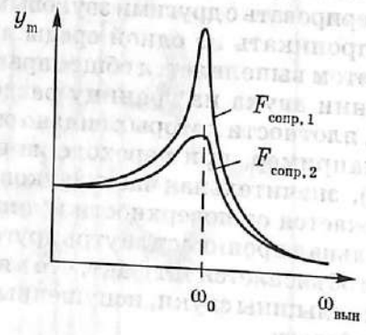
Напротив, ультразвуки поглощаются очень быстро. Например, ультразвук частотой 1 МГЦ ослабляется в воздухе вдвое на расстоянии 2 см, тогда как звук частотой 10 кГц ослабляется вдвое на расстоянии 2200 м.

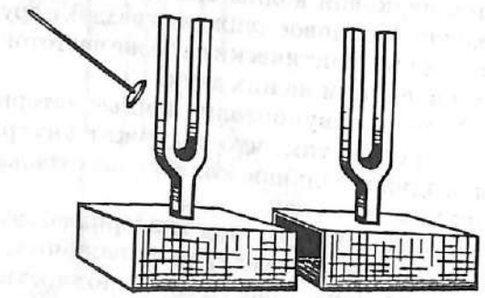
§ 9. АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

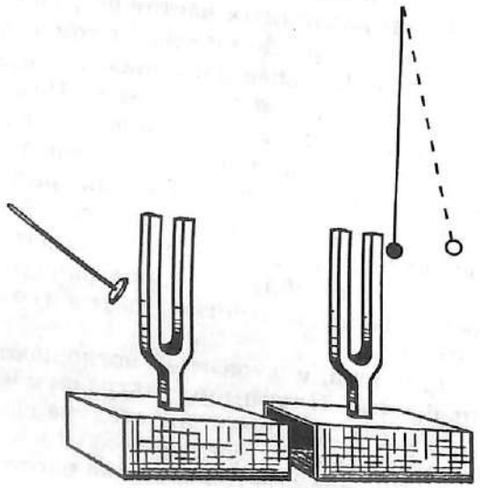
Резонанс

1. Явление резкого увеличения амплитуды колебаний в колебательной системе при совпадении частоты внешней силы с частотой собственных колебаний системы.

2. Резонансная кривая







Любое звучащее тело является колебательной системой. Поэтому оно может совершать как свободные колебания, так и вынужденные.

Как вы помните, вынужденные колебания происходят под действием внешней вынуждающей силы с частотой этой силы. Однако, в случае совпадения частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний наблюдается явление резонанса. При резонансе амплитуда, а значит, и энергия колебаний резко возрастают.

Причина резонанса состоит в том, что при совпадении указанных частот работа вынуждающей силы в течение каждого периода колебаний оказывается положительной, то есть приводит к увеличению механической энергии колебательной системы.

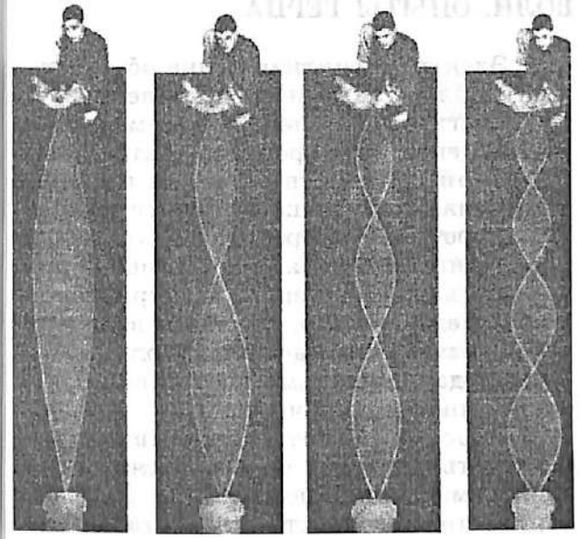
Допустим, что в нашем распоряжении имеется камертон (источник монохроматического звука). Пусть в воздухе распространяется звуковая волна. Тогда, достигнув ножек камертона, волна передаст им часть энергии и возбудит вынужденные колебания камертона.

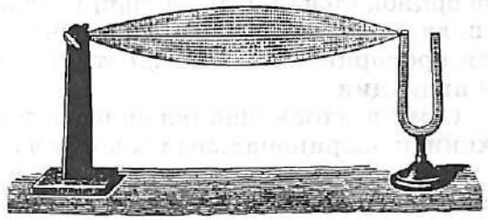
Если частота волны и собственная частота колебаний камертона различны, то камертон практически не колеблется. Другое дело, если частота звуковой волны равна частоте колебаний камертона: в этом случае наступает акустический резонанс.

Проще всего наблюдать акустический резонанс с помощью двух одинаковых камертонов, расположив их на небольшом расстоянии друг от друга так, чтобы отверстия ящиков были направлены друг к другу. Если возбудить колебания одного камертона, ударив молоточком по его ножке, то через некоторое время можно слышать звучание и другого камертона. Его колебания можно обнаружить также при помощи легкой бусинки, подвешенной на нити и помещенной вблизи любой из его ножек.

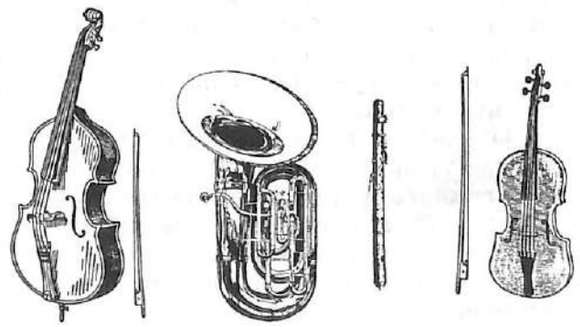
Явление акустического резонанса используется также для усиления звучания камертона. Если вилку камертона снять с ящика и возбудить его колебания, то звук будет очень слабым. Почему?

Мы уже говорили, что звучать может любое тело, в том числе и воздух, так как он является упругим телом. Поэтому столб воздуха, находящийся в ящике (или трубе) обладает набором собственных частот, подобно натянутому шнуру или струне. Следовательно при определенных условиях в нем могут возникать стоячие волны.





При некотором положении уровня воды в цилиндре в воздушном столбе над поверхностью воды возникает стоячая волна и громкость звука увеличивается



Если ящик открыт с одной стороны, то у его закрытой стенки возникает узел, а у открытого конца — пучность. Поскольку длина стоячей волны основного тона равна половине длины бегущей волны, то при длине открытого с одной стороны ящика, равной четверти длины бегущей волны, в ящике образуется стоячая волна.

Ее интенсивность значительно превосходит интенсивность собственного звучания ножек камертона. Когда мы слышим звучание камертона, стоящего на резонаторном ящике, мы воспринимаем звуковую волну, которая в основном создается за счет колебания воздуха в ящике, а не ножек самого камертона.

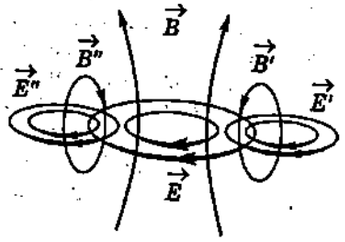
В духовых музыкальных инструментах (орган, кларнет, саксофон) под действием воздушной струи возбуждаются колебания с частотой, равной собственной частоте колебания столба воздуха в трубе. В зависимости от длины трубы возбуждаются колебания той или иной частоты, то есть излучаются звуки разной высоты.

Дека рояля, корпус скрипки, раструб валторны, радиорупор — это резонаторы. Звук одной скрипичной струны невозможно услышать в концертном зале, его многократно усиливает резонатор — корпус скрипки. Он играет и другую роль: придает своеобразный тембр звучанию музыкального инструмента.

А воздух в помещении? Он ведь тоже может «звучать». Конечно. Существует специальный раздел акустики — архитектурная акустика. Специалисты в этой области знаний проектируют концертные, театральные и лекционные залы с хорошими условиями слышимости.

Звуковые волны в любом помещении испытывают многократные отражения от стен и других предметов и могут мешать восприятию звука от основного источника. После того, как источник звука перестал звучать, звуковые волны продолжают «блуждать» в помещении, пока не затухнут. Это время затухания (или реверберации) определяет качество акустики помещения. Если время реверберации велико, то зал становится «гулким». Отраженные звуки накладываются на основной, делая его неразборчивым. Если время реверберации мало, то звуки очень быстро затухают и музыка теряет выразительность.

§ 10. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. ОПЫТЫ ГЕРЦА



Плотность энергии электромагнитного поля:

$$w_{эл} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}; \qquad w_{магн} = \frac{B^2}{2\mu_0};$$

$$w_{эл\text{-}магн} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

В электромагнитной волне:

$$\vec{E} \sim \frac{\Delta\vec{B}}{\Delta t}; \quad \left|\frac{\Delta\vec{B}}{\Delta t}\right| \sim \omega^2; \quad E \sim \omega^2; \qquad \vec{B} \sim \frac{\Delta\vec{E}}{\Delta t}; \quad \left|\frac{\Delta\vec{E}}{\Delta t}\right| \sim \omega^2; \quad B \sim \omega^2$$

$$w_{эл\text{-}магн} \sim \omega^4$$

Плотность потока излучения

1. Обозначение: I

2. Формула-определение: $I = \dfrac{W_{эл\text{-}магн}}{S \cdot \Delta t}$

3. Физический смысл: значение энергии, переносимой волной за единицу времени через контур площадью 1 м² в направлении нормали к контуру.

4. Единица плотности потока: $[I] = \text{Дж}/(\text{м}^2\text{с})$.

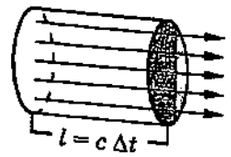
5.

$$I = \frac{W_{эл\text{-}магн}}{S \cdot \Delta t};$$

$$W_{эл\text{-}магн} = w_{эл\text{-}магн} \cdot V;$$

$$V = S \cdot l = S \cdot c \cdot \Delta t;$$

$$I = \frac{w_{эл\text{-}магн} \cdot S \cdot c \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta t} = w_{эл\text{-}магн} \cdot c.$$



Плотность потока излучения электромагнитной волны равна произведению плотности энергии волны на ее скорость (скорость света).

Электромагнитная волна образуется благодаря связи переменных электрических и магнитных полей. При этом чем быстрее изменяется со временем вектор электрической напряженности, тем больше индукция возникающего магнитного поля. И наоборот, чем быстрее изменяется индукция магнитного поля, тем больше напряженность возникающего электрического поля. Следовательно, для образования интенсивных электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты.

Простые расчеты показывают, что плотность энергии (а значит, и вся энергия электромагнитной волны зависит от четвертой степени ее частоты. Действительно, плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности поля, а плотность энергии магнитного поля пропорциональна квадрату магнитной индукции.

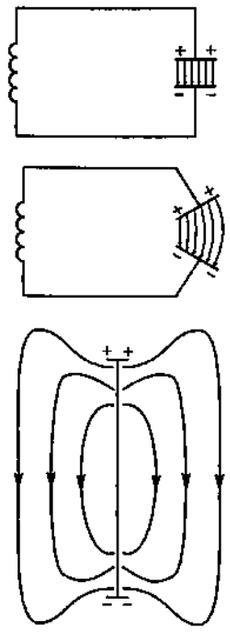
Сами векторы напряженности и индукции пропорциональны квадрату частоты колебаний. Поэтому энергия, которую несет электромагнитная волна, пропорциональна четвертой степени частоты колебаний источника.

Наряду с плотностью энергии для характеристики энергии, которую несет с собой электромагнитное излучение вводят величину, называемую плотностью потока электромагнитного излучения.

Это величина, численная равная энергии перенесенной волной за 1 с через контур площадью 1 м², в направлении нормали к этому контуру.

Как вы помните из курса основной школы, электромагнитные колебания высокой частоты можно создать в колебательном контуре. При этом значения электроемкости конденсатора и индуктивности катушки однозначно определяют частоту собственных колебаний в контуре. Чем меньше значения электроемкости и индуктивности контура, тем выше частота собственных колебаний.

Однако высокая частота колебаний в контуре сама по себе еще не гарантирует интенсивного излучения электромагнитных волн. (Так и камертон, снятый с резонаторного ящика, совершает колебания с такой же частотой и амплитудой, что и на подставке, но звуковая волна, излучаемая им, оказывается очень слабой). Следовательно, необходимо сначала найти другие, не менее важные, чем высокая частота, условия излучения электромагнитных волн.

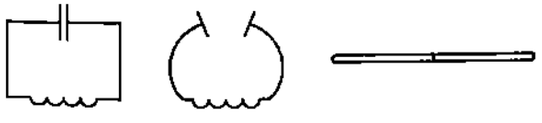


Раздвигая обкладки конденсатора в колебательном контуре и развивая витки катушки, «открываем» колебательный контур и создаем условия для того, чтобы электромагнитное поле возникало во всем пространстве, окружающем контур.

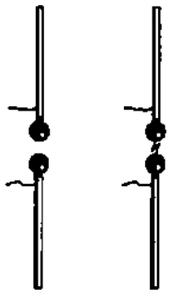
$$T = 2\pi\sqrt{LC};$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Открывая колебательный контур, превращаем его в отрезок прямого провода

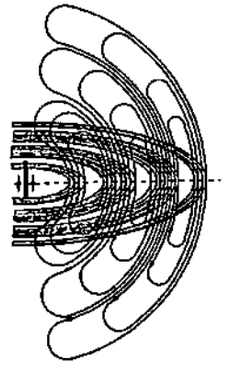


Вибратор Герца



Когда напряжение между шариками вибратора достигнет предельного значения, происходит разряд — в вибраторе возникает быстро переменный электрический ток

Быстро переменный ток в вибраторе, то есть заряд, движущийся с ускорением, излучает электромагнитную волну, и колебания в вибраторе быстро затухают.



Открытый колебательный контур

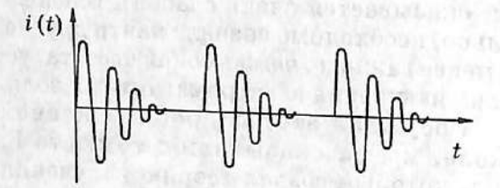
Что же в нем может колебаться? Электроны, как и в обычном колебательном контуре. А как их «заставить» колебаться?

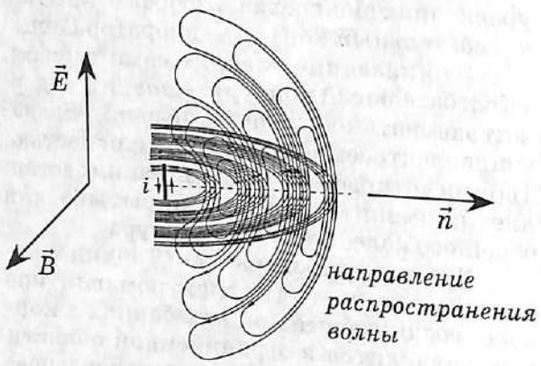
Для этого открытый колебательный контур надо соединить с генератором электрических колебаний или разрезать и чуть-чуть раздвинуть обе половинки провода (тогда образуется искровой промежуток) и присоединить концы проводов к источнику высокого напряжения.

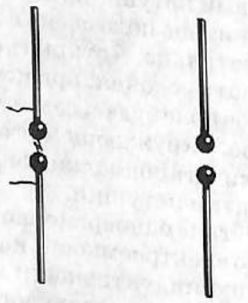
При определенном значении напряжения между половинками вибратора в искровом промежутке возникает искра. Это и есть электрический заряд, который движется с ускорением, и вибратор излучает электромагнитную волну.

Колебания в таком контуре очень быстро затухают. И причин тому — две.

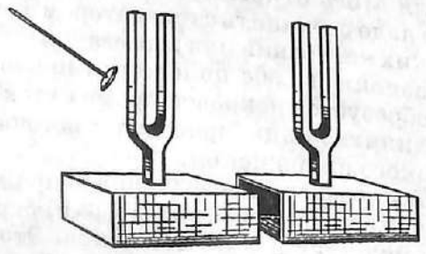
Первая — обычная: превращение энергии во внутреннюю, из-за большого







Если вибраторы одинаковы (то есть имеют равные собственные частоты колебаний), то электромагнитная волна, созданная первым вибратором вызовет резонансные колебания электронов во втором вибраторе.



Звуковая волна, созданная одним камертоном, возбуждает колебания другого камертона. Если камертоны одинаковы (равны их собственные частоты колебаний), то наступает явление резонанса — звучание второго камертона происходит с большой амплитудой.

активного сопротивления искрового промежутка.

Вторая (и это очень важно для нас!) — из-за излучения электромагнитной волны.

После того как искра исчезнет (то есть колебания заряда прекратятся), нужно снова зарядить вибратор, и процесс повторится сначала.

Понятно: если вибратор соединить с генератором незатухающих колебаний, то излучение электромагнитной волны будет происходить в течение всего времени работы генератора.

В своих опытах Герц получал электромагнитные волны, возбуждая в вибраторе серию импульсов быстропеременого тока с помощью источника высокого напряжения. В этом случае колебания в вибраторе совершает не один, а огромное число электронов, движущихся согласованно вдоль «усов» вибратора. Значит, вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости, проходящей через вибратор. Колебания вектора магнитной индукции происходят перпендикулярно этой плоскости. А излучение электромагнитной волны происходит в направлениях, перпендикулярных обоим векторам, то есть перпендикулярно оси вибратора.

Электромагнитные волны регистрировались при помощи такого же вибратора, который вследствие явления резонанса, откликался на действие электромагнитной волны. (Так камертон откликается на звук другого такого же камертона.)

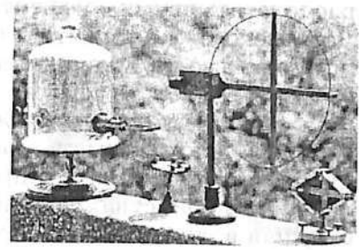
Вспомните, чтобы камертон откликнулся на звук другого камертона, они не только должны иметь одинаковые собственные частоты, но и должны быть расположены определенным образом. Так и в опытах Герца, чтобы наблюдался резонанс и колебания происходили с наибольшей амплитудой, нужно было расположить «усы» приемного вибратора параллельно «усам» вибратора-излучателя. Тогда в искровом промежутке приемного вибратора можно наблюдать искорки разряда в момент приема электромагнитной волны.

Герц не только получил электромагнитные волны, существование которых было предсказано Максвеллом теоретически, но провел тщательное исследование их свойств, доказав, что они ведут себя подобно механическим волнам.

Он наблюдал отражение волн от металлических экранов, изменение направления

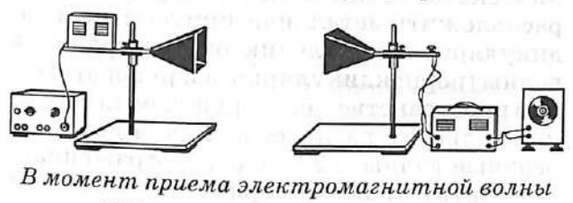
Г. Герц
1857 — 1894

Приборы Г. Герца

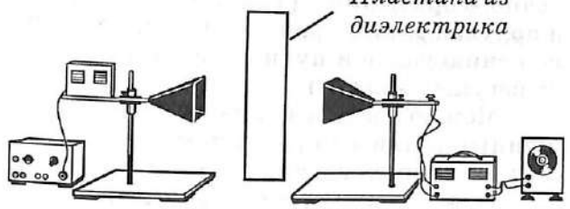


Рупор-излучатель

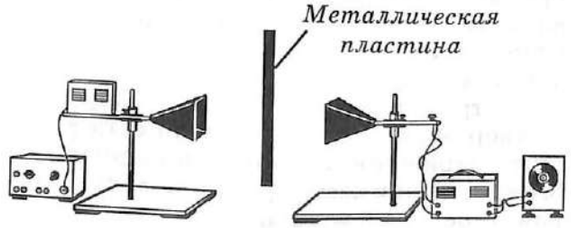
Рупор-приемник



В момент приема электромагнитной волны слышен звук громкоговорителя



Звук громкоговорителя становится тише



Звук громкоговорителя полностью исчезает

распространения волн при переходе в другие непроводящие среды (явление преломления), явления дифракции и интерференции волн. Но пожалуй, самым важным было то, что опытным путем была измерена длина электромагнитной волны, испускаемой вибратором, а по ней была рассчитана скорость электромагнитных волн в воздухе. Полученное в опытах Герца значение скорости электромагнитных волн совпало с теоретическим предсказанием Максвелла и оказалось равным скорости света.

Кроме того, Герц провел серию опытов, в которых было обнаружено, что излучаемые вибратором волны — поперечные, как это и предсказывала теория Масвелла.

Современные радиотехнические устройства позволяют провести наглядные опыты по наблюдению свойств электромагнитных волн в обычном кабинете физики.

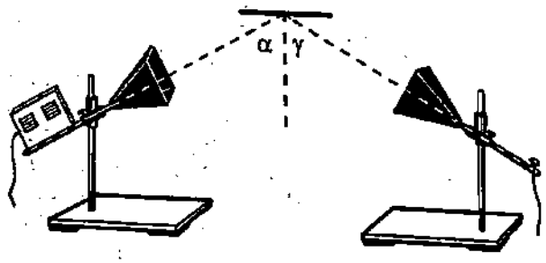
Для этого пользуются источником электромагнитных волн сантиметрового диапазона.

Чтобы наблюдения было удобно проводить, амплитуду колебаний генератора сверхвысокой частоты (СВЧ) модулируют (то есть изменяют) в соответствии со звуковой частотой. После приема такой электромагнитной волны звуковая частота выделяется из нее (детектируется) и подается на громкоговоритель. Таким образом, о наличии приема электромагнитной волны можно судить по звучанию громкоговорителя. Общий вид установки для демонстрации свойств электромагнитных волн показан на рисунке. Электромагнитные волны излучаются рупорной антенной преимущественно в направлении оси рупора. Приемная антенна также имеет форму рупора и улавливает волны, которые распространяются вдоль оси рупора.

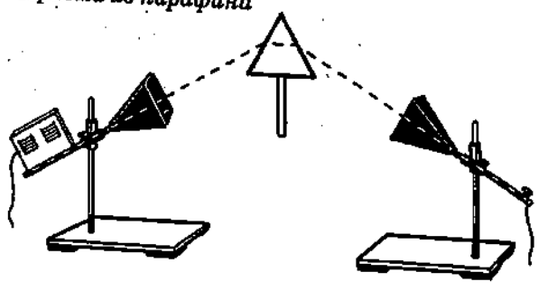
Если расположить рупоры навстречу друг другу так, чтобы их оси совпали, то услышим громкий звук. Громкость звука существенно уменьшается, если между рупорами помещать различные тела из диэлектриков. Опыт свидетельствует о том, что диэлектрики хорошо поглощают электромагнитные волны.

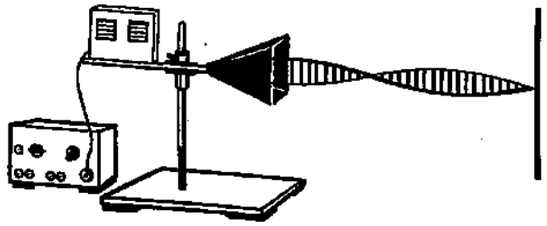
Если между рупорами поместить металлический лист, то звук исчезает.

Следовательно, электромагнитные волны практически полностью отражаются от металлических (проводящих) поверхностей. Направляя оси рупоров под углом к металлическому листу можно проверить



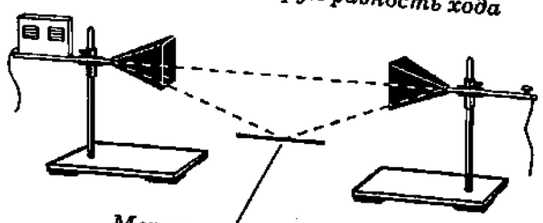
Призма из парафина





В этой области пространства можно наблюдать стоячую волну — результат интерференции бегущей и отраженной волн

Падающая и отраженная волны — когерентны и имеют некоторую разность хода



закон отражения. Как и следует ожидать, при отсутствии металлического листа или изменении его положения, звук не слышен, так как нарушены условия приема волны, испущенной рупором-источником.

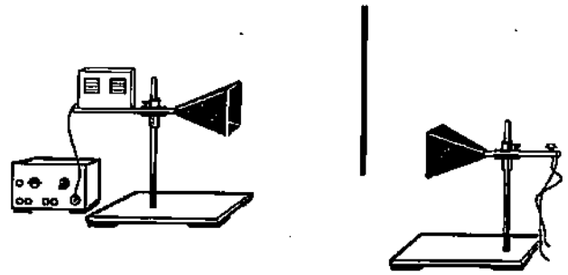
Помещая на пути электромагнитной волны треугольную призму из парафина или другого диэлектрика, можно обнаружить изменение направления распространения волн при переходе из одной среды в другую и установить закон преломления.

Чтобы провести наблюдение интерференции электромагнитных волн, нужно располагать двумя когерентными волнами. Для этого нужно иметь два когерентных источника волн. Если их нет, то нужна другая идея. Чтобы ее сформулировать (а сделать это при желании может каждый из вас!), нужно придумать, как можно получить «другую волну» и направить ее в ту область пространства, где распространяется бегущая волна от источника.

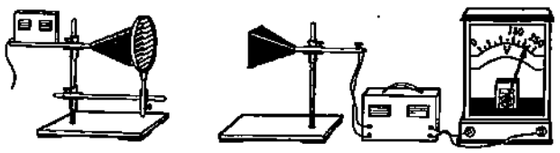
Например, роль «другой волны» может сыграть волна, отраженная от металлического листа. В одном случае можно расположить металлический лист перпендикулярно направлению распространения волны (перпендикулярно оси рупора). Тогда в пространстве между рупором-источником и листом распространяются две когерентные волны: падающая и отраженная. Результатом их интерференции может стать стоячая волна, узлы и пучности которой можно обнаружить при помощи точечного приемника. (Такую стоячую волну и получал Герц в своих опытах и по расположению узлов и пучностей измерял длину бегущей волны.)

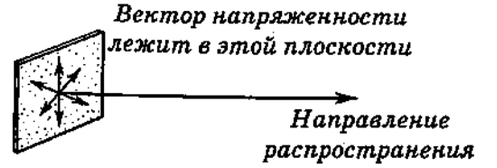
Можно поступить иначе. Волны, испущенные нашим источником, преимущественно распространяются вдоль оси рупора. Но не только: они распространяются в расширяющейся области пространства, ограниченной вблизи источника стенками рупора. Значит, если расположить рупор-приемник точно напротив рупора-источника, а под ними расположить горизонтально металлический лист, то от него произойдет отражение волны.

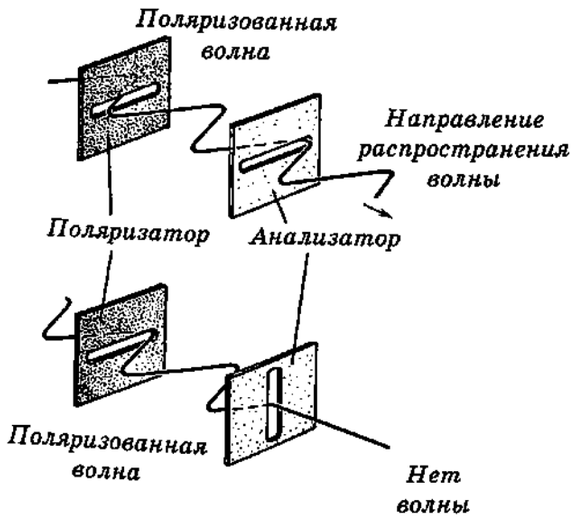
Отраженную волну можно направить в створ рупора-приемника, то есть наложить отраженную волну на падающую. Между ними имеется разность хода, которая определит условие интерференции. Перемещая металлический лист (поднимая его вверх или опуская), можно обнаружить



В области геометрической тени металлического экрана слышен звук громкоговорителя, значит, наблюдается прием электромагнитной волны, обогнувшей препятствие







усиление или ослабление звука, так как при движении листа меняется разность хода волн и максимумы и минимумы интерференции сменяют друг друга .

Помещая на пути падающей волны металлические экраны разных размеров, можно обнаружить явление огибания волной преград: при помощи приемника волн можно обнаружить электромагнитную волну в области геометрической тени экрана. Когда размеры преград малы по сравнению с длиной волны, она распространяется практически беспрепятственно.

Используя металлические решетки, можно доказать поперечность электромагнитных волн. В нашей установке колебания вектора напряженности происходят в определенной плоскости. Она перпендикулярна оси рупора. Волны с определенным направлением колебаний вектора напряженности (а значит, и вектора магнитной индукции) называются **поляризованными**. В нашей установке испускаются поляризованные волны. Убедиться в этом можно так. Повернем рупор приемника вокруг своей оси на 90°. Звук немедленно прекращается.

Убедившись в том, что наш источник дает волну со сторого определенным направлением вектора напряженности поля, расположим приемник так, чтобы обеспечить прием волны. Теперь поставим на пути волны решетку, образованную параллельными металлическими прутьями.

Решетку можно устанавливать так, чтобы прутья были вертикальными,горизонтальными или занимали промежуточное положение.

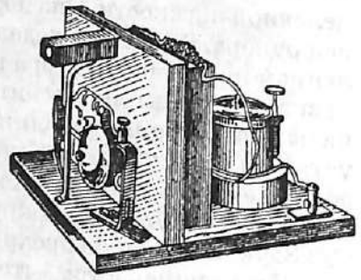
Опыт показывает, что поляризованная электромагнитная волна проходит сквозь решетку только при одной ориентации прутьев по отношению к вектору напряженности: когда вектор напряженности перпендикулярен прутьям решетки.

Когда вектор напряженности параллелен прутьям решетки, в них возбуждаются токи, в результате чего решетка отражает волны подобно сплошному металлическому листу.

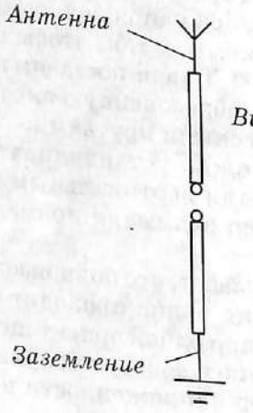
Явление поляризации (то есть выделение волн с одним направлением колебаний вектора в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны) присуще только поперечным волнам. Оно может служить в качестве явления, позволяющего отличить поперечные волны от продольных.

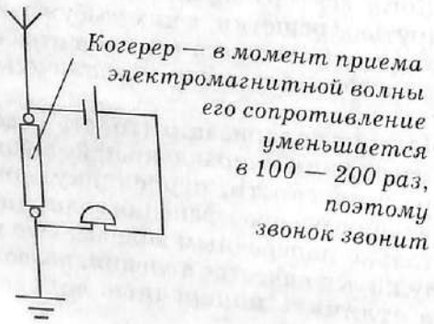
§ 11. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

А. С. Попов
1859 — 1905



Приемник А. С. Попова





Опыты Г. Герца, описание которых появилось в 1888 году, вызвали большой интерес ученых всего мира. Вероятно, у многих появилась мысль использовать электромагнитные волны для передачи информации. Однако сам Г. Герц относился к идее беспроволочной телефонной связи весьма скептически. По его мнению, сравнительно медленные электрические колебания акустических частот не могут передаваться на значительные расстояния, так как энергия таких волн сравнительно невелика, а длина волн, напротив, может достигать сотни километров. Ведь во времена Герца никто еще не знал о принципиальной возможности «нагружать» высокочастотную электромагнитную волну низкочастотной информацией.

В России одним из первых изучением возможностей передачи электромагнитных волн занялся преподаватель минных курсов в Кронштадте А. С. Попов. Он начал с воспроизведения опытов Герца, а затем нашел способ передачи электромагнитных сигналов на большие расстояния.

Главная задача, которую предстояло решить А. С. Попову, состояла в создании чувствительного приемника электромагнитных волн. Дело в том, что было известно, как создавать волны, как повышать их интенсивность (например, путем повышения мощности разряда), но маленькая, едва заметная искорка в приемном вибраторе Герца не годилась для реализации идеи беспроволочной связи.

Для создания своего приемника А. С. Попов воспользовался прибором, который был к тому времени изобретен французским физиком Э. Бранли. Этот прибор назывался **когерером**.

Его действие основано на свойстве мелких металлических опилок спекаться под воздействием электрических разрядов. В обычном состоянии сопротивление такого порошка велико, так как отдельные частички порошка имеют плохой контакт друг с другом. Когда пришедшая электромагнитная волна создает в порошке переменный ток высокой частоты, между частичками проскакивают искорки, которые спекают частицы в единый монолит. Его сопротивление резко уменьшается.

В опытах А. С. Попова металлические опилки заполняли стеклянную трубку, в

Блок-схема радиотракта

которую были впаяны два электрода, позволяющие включать когерер в искровой промежуток приемника-вибратора.

Сопротивление когерера в начальный момент составляло около 100 кОм, а после спекания опилок, в момент приема волны уменьшалось в 100-200 раз. Фактически когерер — очень чувствительный к электромагнитному сигналу «ключ», замыкающий цепь батареи с подключенным в ней электрическим звонком. Звонок сигнализировал о приеме электромагнитной волны.

Одновременно он использовался для возвращения когерера в рабочее состояние. Дело в том, что после спекания опилок когерер утрачивал способность к приему электромагнитных волн. Чтобы ее восстановить, когерер нужно встряхнуть. Именно это и делал молоточек звонка, ударяя по когереру. Это обеспечивало автоматический прием электромагнитных волн, что являлось важным звеном в осуществлении беспроволочной связи.

Чтобы повысить чувствительность и дальность приема своего первого приемника — «грозоотметчика» — А. С. Попов один из электродов когерера соединил с землей (заземление), а другой присоединил к куску проволоки и поднял ее высоко над землей (антенна).

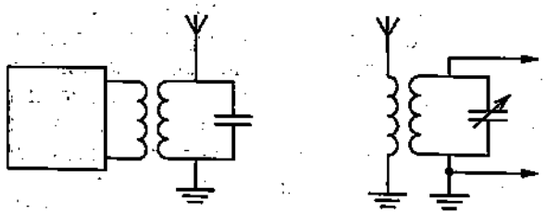
Хотя современные радио- и телевизионные приемники внешне совершенно не похожи на приемник А. С. Попова, принцип их действия точно такой же.

Электромагнитная волна вызывает в антенне слабые электрические токи. Эти электрические токи используются для управления процессами, происходящими в цепях, которые питаются от независимых источников энергии.

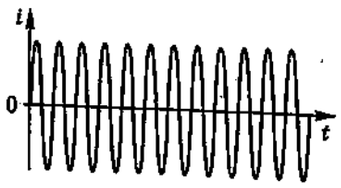
7 мая 1895 года на заседании Российского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал действие своего приемника. Этот день по праву считается днем «рождения» радио.

В дальнейшем ученый продолжал работу над совершенствованием приемной и передающей аппаратуры. Он ставил своей задачей создание прибора для передачи сигналов на большие расстояния. Уже через 4 года на маневрах Черноморского флота А. С. Попов установил связь на расстоянии свыше 20 км, а в 1906 году дальность радиосвязи составила уже 150 км. Одновременно ученый работал над усовершенствованием приемных устройств. Сначала он

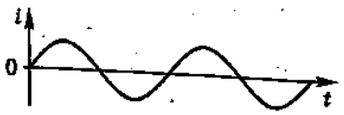
1. Использование для связи высокочастотных электромагнитных волн



2. Для передачи информации высокочастотную волну модулируют

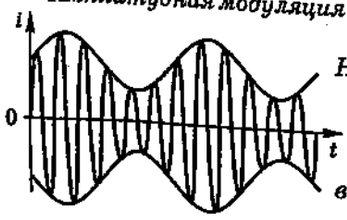


Эта волна «понесет» информацию



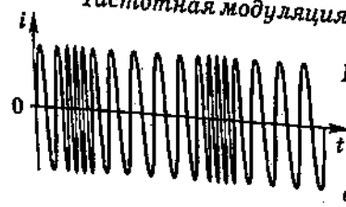
Такую информацию нужно передать на расстояние

Амплитудная модуляция



Низкочастотная информация закодирована в амплитуде высокочастотной волны

Частотная модуляция



Низкочастотная информация закодирована в частоте высокочастотной волны

подключил параллельно звонку телеграфный аппарат, позволявший вести автоматическую запись сигналов, а затем обнаружил возможность приема сигналов с помощью телефона.

За границей усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили осуществить радиотелеграфную связь через Атлантический океан. Началась эра электромагнитной цивилизации.

Каковы же принципы современной радиосвязи? Фактически все они были уже перечислены при рассказе об электромагнитых волнах. Поэтому сформулируем их более конкретно и четко, не вдаваясь в технические детали, которые обновляются вместе с современными высокими технологиями очень быстро.

Первый принцип — использование для реализации идеи беспроволочной радио- и телевизионной связи высокочастотных электромагнитных волн. Они распространяются в пространстве со скоростью света. Повышение частоты колебаний приводит к увеличению энергии волны (при прочих равных условиях), что повышает дальность ее распространения. Сегодня при помощи средств радиосвязи можно осуществить связь с любой точкой земного шара и обеспечить устойчивую космическую радио- и телевизионную связь практически на любые расстояния.

Второй принцип — модуляция электромагнитной волны, состоит в изменении какого-либо из параметров волны в соответствии с той информацией, которую хотят передать с помощью волны. В данной среде скорость распространения волн постоянна, а амплитуда, частота (и длина волны) и фаза колебаний могут изменяться в соответствии с передаваемой информацией. Поэтому различают амплитудную, частотную и фазовую модуляцию. Модуляция — «медленный» процесс. За время модуляции (загрузки информации в волну) колебательная система успевает совершить огромное число колебаний, прежде чем модулируемая величина (например, амплитуда) изменится сколько-нибудь заметным образом.

Третий принцип — демодуляция или детектирование. Это процесс выделения из модулированной (нагруженной информацией) волны низкочастотного сигнала (собственно информации) и преобразование его в акустический или видеосигнал.

3. Низкочастотную информацию извлекают путем детектирования (демодуляции)

4. Для приема электромагнитной волны используют антенну с заземлением и выделяют нужную частоту при помощи явления резонанса

Наименование радиоволн	Диапазон длин волн в вакууме, м	Специфические свойства и применение
Сверхдлинные	> 10 000	для связи не используются
Длинные	> 1000	устойчивая, надежная радиосвязь на больших расстояниях за счет дифракции
Средние	1000 – 100	
Короткие	100 – 10	многократно отражаются от ионосферы
Ультракороткие:		
метровые	10 – 1	используются для связи в пределах прямой видимости; проникают сквозь ионосферу, поэтому используются для осуществления космической связи
дециметровые	1 – 0,1	
сантиметровые	0,1 – 0,01	
миллиметровые	0,01 – 0,001	

Радиолокация

1. Метод обнаружения и точного определения координат тела, а также его скорости и траектории движения при помощи электромагнитных волн.

2. Используются волны частотой $10^8 – 10^{10}$ Гц

3. Радиолокационные установки работают в импульсном режиме. Длительность импульса τ - 1мкс, квазипериод – T - 1мс.

4. Расстояние до объекта:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

5. Предельная дальность

$$R = \frac{c \cdot T}{2}$$

достигает нескольких сотен километров.

6. Нечувствительна ко времени суток и метеорологическим условиям.

В процессе передачи и приема электромагнитной волны большую роль играет использование антенн (передающей и приемной), а также заземления.

Однако, эти устройства не относятся к принципам радиосвязи. Это технические устройства, которые, как уже говорилось, позволяют повышать чувствительность и дальность приема и передачи электромагнитных волн. А вот использование явления резонанса для выделения из множества принимаемых антенной электромагнитных волн той, которая нужна именно вам (выбор канала связи), следует отнести к четвертому принципу радиосвязи.

На рисунках к параграфу показана блок-схема радиосвязи и блок-схема радиовещательного канала. Они снабжены небольшим комментарием, который поможет понять последовательность действий в процессе передачи и приема информации при помощи электромагнитных волн.

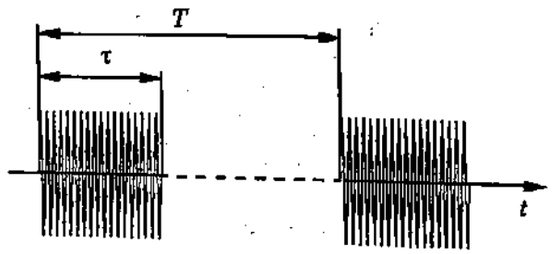
Информация о диапазонах радиоволн, используемых в современных средствах связи, и особенностях распространения волн представлена в таблице.

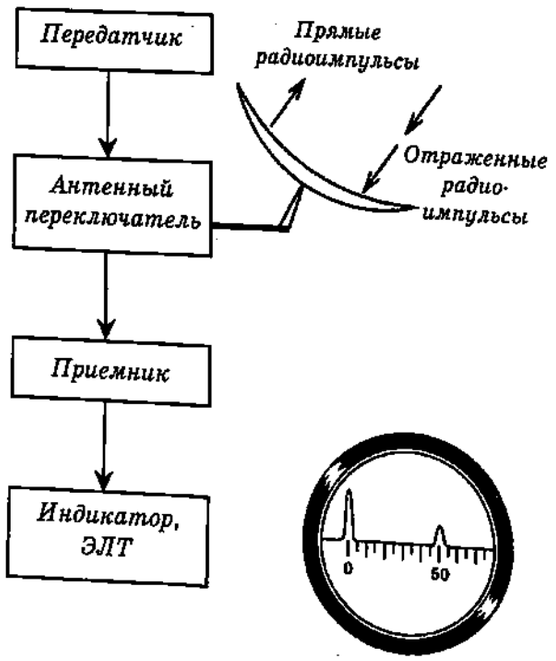
В завершение темы рассмотрим вопрос об использовании электромагнитных волн для обнаружения и точного определения положения объектов (как природного, так и искусственного происхождения).

Этот метод получил название радиолокации. Он основан на использовании явления отражения электромагнитных волн от проводящих поверхностей.

Как вы помните, волны отражаются от тех объектов, размеры которых велики по сравнению с длиной волны. Поэтому размеры разыскиваемого объекта определяют частоту используемого излучения.

Обычно для радиолокации используют волны из диапазона СВЧ ($10^8 — 10^{10}$Гц). Кроме того в радиолокации используют узко направленный пучок электромагнитных волн, что тоже возможно только при использовании очень коротких волн. Для создания таких пучков используют специальные антенны. Для дециметровых и более коротких волн используют антенны в виде вогнутых металлических зеркал, в фокусе которых располагается излучающий диполь. Если используются более длинные волны, то антенны представляют собой сложные устройства, состоящие из





Применение радиолокации:

1. Оборонные нужды страны: обнаружение ракет, самолетов, кораблей, орудийная наводка.

2. Обеспечение безопасности полета самолетов и плавания судов (картина расположения объектов, отражающих и рассеивающих радиоволны).

3. Обеспечение безопасности взлета и посадки самолетов.

4. Исследование космического пространства (локация поверхности ближайших планет, установление расстояния до небесных тел, установление периодов обращения планет вокруг своей оси и т.п.)

5. Метеоритная служба Земли.

6. Метеорологические наблюдения за облаками, грозовыми фронтами, ураганами, их движением и развитием.

большого числа когерентных источников волн, расположенных в определенном порядке. Волны, созданные разными источниками, интерферируют так, что результатом интерференции является ослабление волн во всех направлениях, кроме одного.

Пучок электромагнитного излучения (луч радиолокатора) посылается к объекту, отражается от него и принимается той же антенной. В момент приема определяется направление луча — это и есть направление на объект.

Радиолокатор работает в импульсном режиме.

Посылаемый сигнал излучается в течение некоторого промежутка времени в виде короткого импульса. Длительность импульса составляет миллионные доли секунды. Промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше.

За это время сигнал должен успеть достичь цели и вернуться назад. Таким образом, время «молчания» радиолокатора определяет дальность его действия.

Современная радиолокационная установка — сложное радиотехническое сооружение, работающее в автоматическом режиме.

В момент отправления сигнала антенна работает в режиме «передача». Одновременно с посылкой импульса на экране электронно-лучевой трубки появляется отметка о посылке импульса. В течение всего времени «молчания» локатора, электронный луч будет двигаться по экрану ЭЛТ равномерно, если в какой-то момент времени не придет отраженный сигнал.

Чтобы быть готовой к приему сигнала, сразу после испускания импульса антенна приводится в режим «приема» и соединяется с приемником.

Принятый отраженный сигнал усиливается и подается на ЭЛТ. На экране возникает другой всплеск. Если проградуировать шкалу на экране в километрах, то положение этого принятого сигнала сразу позволяет прочитать расстояние до цели.

Для определения точного направления на объект антенна делается подвижной и способна поворачиваться в любом направлении. Зная ориентацию антенны и расстояние до цели по лучу, определяют ее координаты. Если радиолокатор «следит» за движением цели, то информация об изменении положения объекта позволяет найти скорость и рассчитать траекторию этого объекта.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ

1. Частица среды
2. Абсолютно упругая однородная изотропная среда
3. Точечный источник
4. Волновая поверхность
5. Луч
6. Когерентные источники
7. Электромагнитное поле

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

1. Бегущая волна
2. Гармонические колебания
3. Продольная волна
4. Поперечная волна

ПРИНЦИПЫ

Принцип Гюйгенса: каждая частица среды, до которой дошло возбуждение, становится источником вторичных волн.

ЗАКОНЫ

1. Закон отражения волн
2. Закон преломления волн

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ (ВЕЛИЧИНЫ)

1. Частота	Число полных колебаний за 1 с	ν	Зависит от выбора источника	$\nu=\frac{1}{T}$
2. Период	Время одного полного колебания	T	Зависит от выбора источника	
3. Скорость волны	Отношение расстояния, на которое распространилась волна, к соответствующему промежутку времени	υ	Зависит от свойств среды и ее состояния	$\bar{\upsilon}=\frac{\bar{s}}{t}$
4. Длина волны	Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний	λ	Зависит от частоты источника и свойств среды	$\lambda=\upsilon T$
5. Фаза колебания в волне	Аргумент тригонометрической функции, полностью характеризующий состояние частицы в данный момент времени	φ	Зависит от начальной фазы источника, частоты колебаний и расстояния от источника	$\varphi=2\pi(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda})$
6. Энергия	Функция состояния, характеризующая способность объекта совершать работу	W	Зависит от мощности источника и частоты	
7. Плотность энергии	Энергия единицы объема (для объектов, нелокализованных в пространстве – полей, волн)	w	Зависит от квадрата напряженности и индукции электромагнитного поля	$w_э=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$ $w_м=\frac{B^2}{2\mu_0}$
8. Плотность потока энергии	Энергия, переносимая волной за 1 с через контур площадью 1 м² в направлении нормали к контуру	I	Зависит от плотности энергии и скорости волны	$I=w\cdot c$
6. Угол падения	Угол между падающим лучом и перпендикуляром, восставленным в точке падения луча	α	Зависит от направления распространения волны по отношению к поверхности	
7. Угол отражения	Угол между отраженным лучом и перпендикуляром, восставленным в точке отражения луча	γ	Зависит от угла падения	$\gamma=\alpha$
8. Угол преломления	Угол между преломленным лучом и перпендикуляром, восставленным в точке преломления	β	Зависит от угла падения и соотношения скоростей волн в данной паре сред	$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}=n$

ОПТИКА

Предметом нашего дальнейшего изучения станет свет — самый важный источник энергии и информации для человека. Как вы знаете из курса физики основной школы, свет имеет электромагнитную природу. Он излучается в процессах, происходящих внутри атомов, а также при движении заряженных частиц с очень большими ускорениями.

Будучи объектом электромагнитной природы, свет обнаруживает сходные свойства с уже изученными ранее электромагнитными волнами.

И главное из этих свойств — способность распространяться в вакууме с постоянной скоростью, скоростью распространения электромагнитных волн в вакууме. При изучении электромагнитных волн вам наверняка приходилось сопоставлять их свойства с известными вам свойствами света: отражением и преломлением. При описании волновых процессов мы пользовались понятием луча, но, как вам известно, само это понятие пришло в физику из наблюдений за распространением света, который в однородной среде распространяется прямолинейно. Луч указывает направление узкого светового пучка, исходящего из источника, и совпадает с направлением переноса энергии светом.

В основном курсе физики вы также узнали, что свет способен огибать преграды, что существуют явления, которые можно объяснить на основе интерференции, что, наконец, свет можно поляризовать. Все это делает свет поразительно похожим на электромагнитные волны.

Тогда, может быть, и нет необходимости изучать свет особо, ведь главные свойства электромагнитных излучений нам уже знакомы: достаточно применить их для волн другого диапазона, более коротких, чем самые короткие волны из диапазона ультракоротких волн? Возможно так и следовало бы поступить, если бы, по выражению самих физиков, свет не был бы «самым темным местом в физике»!

Дело в том, что на рубеже XIX и XX веков были сделаны открытия, которые невозможно объяснить на основе волновых представлений о свете. Например, оказалось, что скорость света не зависит от скорости движения источника света и приемника света и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Было обнаружено явление фотоэффекта, объяснение которого стало возможным только на основе представлений о свете как о потоке частиц, каждая из которых обладает определенными свойствами и не может быть поделена на более мелкие частицы. Эти частицы (фотоны) рождаются, имея скорость, равную скорости света, их нельзя «затормозить» или «ускорить». «Исчезают» же фотоны во всех процессах целиком (поэтому их называют также «квантами», порциями энергии). Представление о квантовых (корпускулярных) свойствах света позволило разрешить проблему «ультрафиолетовой катастрофы», возникшую из попыток объяснить излучение нагретого тела (а точнее: абсолютно черного тела) на основе волновых представлений о свете.

Так что же такое свет: волна или частица? Этот вопрос восходит еще ко временам Ньютона и Гюйгенса, каждый из которых был основоположником своей теории света. Ньютон считал свет потоком корпускул, а Гюйгенс — волной, распространяющейся в «эфире», гипотетической ненаблюдаемой среде, которая заполняет все пространство, и способна проникать во все тела, как древнегреческая «пустота».

С тех пор наблюдения за световыми явлениями приносили факты, которые перевешивали поочередно ту или иную «чашу весов»...

Так что же такое свет? Думаю, что многие из вас способны ответить на этот принципиальный вопрос. Это объект, имеющий электромагнитную природу, и проявляющий, в зависимости от условий, то свойства волны, то свойства частицы.

Ведь и волна, и частица — не более, чем физические модели реального объекта, который мы называем светом. Эти, казалось бы, противоречивые свойства, удалось объединить в 30-е годы XX века непротиворечивым образом в рамках новой физической теории — квантовой физике.

Шагом на пути к этой теории в нашем курсе станет изучение оптики — науки о свете.

§ 12. ФИЗИЧЕСКАЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

ОПТИКА (ФИЗИЧЕСКАЯ)	
Основные задачи: — установить природу света; — объяснить весь спектр наблюдаемых явлений, исходя из природы света; — предсказать новые явления и обнаружить их в ходе эксперимента.	
ВОЛНОВАЯ	КОРПУСКУЛЯРНАЯ
Модель	
точечный источник света, гармоническая монохроматическая волна	источник света – совокупность излучающих атомов, поток частиц
Основные характеристики	
частота, скорость, длина волны, амплитуда, плотность потока излучения	масса, скорость, энергия, импульс
Основные явления	
прямолинейное распространение, отражение, преломление, интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия, давление света	прямолинейное распространение, отражение, преломление, дисперсия, давление света, фотоэффект, комптоновское рассеяние света
Границы применимости	
длина волны сравнима с размерами тел, с которыми свет взаимодействует	при излучении света и при взаимодействии с веществом на уровне атомов и молекул
Характер законов	
динамический детерминизм, причинность	статистический, вероятностный
Частный случай: ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	
Модели: точечный источник света, протяженный источник света, луч. **Законы:** прямолинейного распространения света, отражения и преломления получены на основе многочисленных опытов.	

Традиционно оптика делится на две части. Первая — геометрическая оптика — изучает закономерности распространения световых лучей и не рассматривает вопрос о природе света. Вторая — физическая оптика — исходит из представления о свете как об электромагнитной волне.

Согласно современным представлениям, геометрическая оптика может рассматриваться как частный случай волновой (в приближении, когда размеры объектов, с которыми взаимодействует свет, значительно больше длины световой волны). Однако, представление о свете как об электромагнитной волне не отражают полностью свойства этого физического объекта. Они, как уже было сказано, должны быть дополнены квантовыми представлениями.

С обыденной точки зрения объекты, обладающие волновыми свойствами не имеют ничего общего с объектами, проявляющими свойства частицы. Это своего рода антиподы. Однако, можно назвать и общие признаки волны и частицы: во-первых, эти объекты материальны, они обладают способностью взаимодействовать с различными телами. В этом смысле можно говорить об энергии волны и частицы. Во-вторых, и волне, и частице свойственно движение, а скорость движения является важнейшей количественной характеристикой состояния изучаемого объекта.

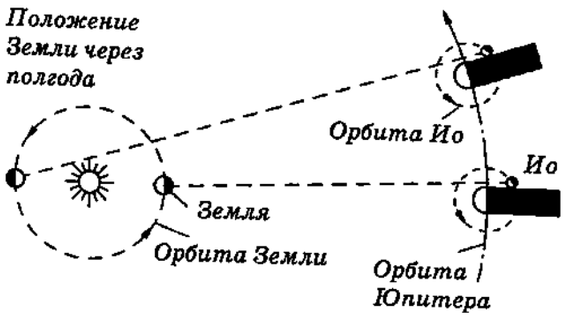
Определение скорости света сыграло в развитии физики очень важную роль. Это — одна из важнейших физических постоянных мира, в котором мы живем. Измерение скорости света явилось шагом к выяснению его природы.

Наконец, скорость света в вакууме предельна, то есть ни одно тело не может иметь скорость, превышающую ее. Именно поэтому изучение оптики в старшей школе мы начнем с обсуждения вопроса об измерении скорости света.

Одна из первых попыток измерить скорость света принадлежала Г. Галилею. Два наблюдателя с фонарями располагались на вершинах двух холмов на расстоянии около 1,5 км друг от друга.

Один из них подавал световой сигнал другому, а тот сигнализировал о приеме сигнала своим фонарем. Первый наблюдатель измерял время, прошедшее между мо-

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА	
Астрономические	Лабораторные
Главная особенность	
использование расстояний астрономических масштабов и традиционных способов измерения времени	использование специальных устройств для измерения очень малых временных промежутков и очень малых по сравнению с размерами Земли расстояний
Первые и наиболее значимые измерения скорости света (годы опытов)	
О. Рёмер (1676) – наблюдение затмения Ио	И. Физо (1849) – использовал вращение зубчатого колеса для измерения времени, расстояние ~ 18 км. Ж. Фуко (1850) – использовал вращающееся зеркало, расстояние ~ 20 м. Измерил скорость света в воде. А. Майкельсон (1878 – 1882) – использовал вращающуюся зеркальную призму, получил самые точные результаты для своего времени
Современное значение скорости света в вакууме: (299792458 ± 1) м/с	



ментом отправления и моментом приема сигнала по числу ударов своего пульса.

Это время оказывалось, хотя и очень малым, но конечным, что позволяло высказать предположение о конечности скорости света. Галилей сразу понял, что при таком измерении времени главную роль играет реакция нервной и мышечной систем человека, поэтому результаты опыта были признаны неудовлетворительными.

Какие же причины не позволили измерить скорость света? Попробуем рассмотреть эту проблему с позиции современного человека. Значение скорости света для него очень велико. Это значит, что если мы захотим воспользоваться для измерения времени, скажем, секундомером, необходимо расположить источник света весьма далеко, на расстоянии, значительно превышающем размеры Земли. Так появилась идея провести измерение скорости астрономическими методами. Если же в качестве расстояния выбирать отрезки в пределах прямой видимости на Земле, то придется придумать способ точного измерения очень малых промежутков времени.

Так появилась идея лабораторных опытов измерения скорости света. Рассмотрим эти методы. Начнем с астрономических, так впервые измерить скорость света удалось датскому астроному О. Рёмеру в 1676 году. Рёмер наблюдал затмение спутника Юпитера Ио. Тела Солнечной системы, как вам известно, светят отраженным светом Солнца. Рёмер наблюдал в телескоп, как спутник проходил перед планетой, затем заходил в ее тень и переставал быть видимым с Земли в течение некоторого времени. Затем спутник появлялся как мгновенно вспыхнувшая лампа.

Промежуток времени между двумя последовательными появлениями Ио из тени Юпитера составляет примерно 42,5 часа, когда Земля и Юпитер находятся по одну сторону от Солнца. Через полгода, когда Земля оказывается в противоположной точке своей орбиты, это время оказалось примерно на 22 минуты больше. Рёмер объяснил это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 минуты раньше. Запаздывание в этом случае происходит от того, что свет употребляет 22 минуты на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная это расстояние — диаметр орбиты Земли, и поделив его на время, Рёмер получил для скорости света значение 215000 км/с.

Это первое измеренное на опыте значение скорости света оказалось огромным для человека, но конечным числом, и стало ориентиром для последующих исследователей.

Лабораторным методом скорость света впервые была измерена французским ученым И. Физо в 1849 г. Свет от источника проходил через собирающую линзу и падал на полупрозрачную пластинку, от которой частично отражался и направлялся на зубчатое колесо.

Допустим, что колесо сначала неподвижно и узкий пучок света попадает в прорезь между двумя зубцами. Свет проходит между зубцами, и дальше, пройдя расстояние около 9 км попадает на плоское зеркало под углом 0°. Отражаясь от него, свет движется в противоположном направлении, снова проходит между этими же зубцами и попадает на полупрозрачную пластинку. Здесь часть света снова отражается, а другая — проходит насквозь и попадает в глаз наблюдателя и он видит источник света. При таком ходе светового пучка в глаза наблюдателя не попадает прямой свет от источника, он видит источник, только если его свет прошел примерно 18 км (путь до зеркала и обратно).

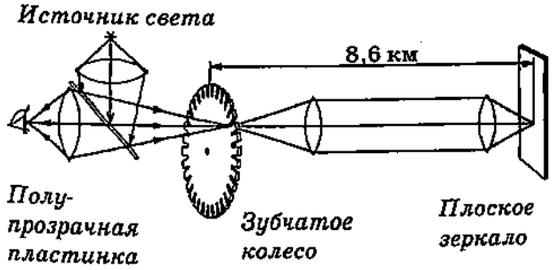
Но ведь в этом опыте мы пока не указали, как будем измерять время! Верно, для измерения малых промежутков времени Физо использовал вращение зубчатого колеса! Допустим, что пучок света прошел между зубцами колеса на пути «туда» и попал на зубец, пройдя обратный путь. Тогда наблюдатель перестает видеть источник света. Увеличим скорость вращения колеса. Когда за время, необходимое свету на путь до зеркала и обратно, на месте прорези, через которую свет прошел к зеркалу, окажется соседняя прорезь, наблюдатель снова видит источник света.

Таким образом, постепенно увеличивая скорость вращения зубчатого колеса можно наблюдать периодическое исчезновение света источника и новое его появление. Зная число оборотов, которое делает за 1 с зубчатое колесо, и число зубцов на нем, можно рассчитать время, которое необходимо свету, чтобы пройти расстояние до зеркала и обратно. По ним можно рассчитать скорость света. В опытах Физо для ско-

По современным данным $d_{орбиты} = 300 \cdot 10^6$ км

$$c = \frac{d}{t} = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ км}}{22 \cdot 60 \text{ с}} \approx 0{,}23 \cdot 10^6 \frac{\text{км}}{\text{с}};$$

$$c \approx 230000 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$



Через прорезь между зубцами можно увидеть источник света

Параметры установки Физо:

$l = 8,6$ км

$N = 720$ (число зубцов)

первое затемнение наступало при частоте вращения $\nu_1 = 12,6$ Гц

Оценим по этим данным значение скорости света в воздухе.

1. Угол между двумя соседними зубцами:

$$\varphi = \frac{2\pi}{N}.$$

2. Первое затемнение источника света наступит, если колесо повернется на угол

$$\varphi_1 = \frac{\varphi}{2} = \frac{2\pi}{2N} = \frac{\pi}{N},$$

так как в этом случае на месте прорези окажется зубец.

3. Первое затемнение наблюдалось при частоте вращения ν_1, следовательно, $\omega_1 = 2\pi\nu_1$ и время поворота составило:

$$\omega_1 = \frac{\varphi_1}{t}; \qquad t = \frac{\varphi_1}{\omega_1} = \frac{\pi}{2\pi\nu_1 N} = \frac{1}{2\nu_1 N}.$$

4. За это время свет пройдет расстояние от прорези до зеркала и обратно до зубца колеса, то есть:

$$t = \frac{2l}{c},$$

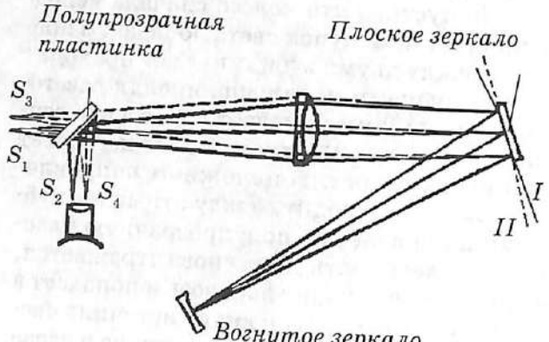
где c – скорость света.

5. Следовательно, скорость света равна:

$$\frac{2l}{c} = \frac{1}{2\nu_1 N}; \qquad c = 4l\nu_1 N.$$

6. Проведем вычисления:

$$c = 4 \cdot 8{,}6 \cdot 12{,}6 \cdot 720 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 313000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$$

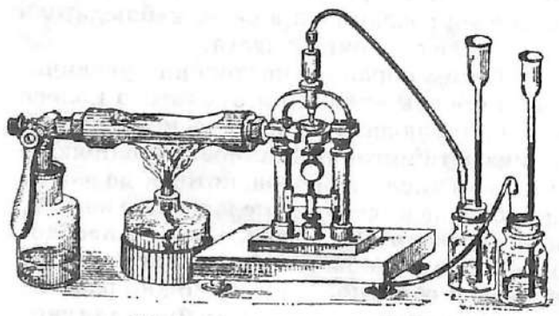


Вогнутое зеркало (расстояние между его полюсом и плоским зеркалом строго фиксировано)

В положении плоского зеркала I изображение точечного источника света S_1 наблюдалось в точке S_2.

В положении плоского зеркала II изображение точечного источника света S_1 наблюдалось в точке S_4.

Измеряя расстояние между S_2 и S_4 и зная, на какой угол повернулось плоское зеркало за время, пока свет шел от него до вогнутого зеркала и обратно, Фуко рассчитал скорость света. В промежуток между плоским зеркалом и вогнутым помещалась труба, заполненная водой, это давало возможность измерить скорость света в воде.



Общий вид установки Фуко

рости света было получено значение 313000 км/с.

Очень важным для дальнейшего развития волновой теории света явилось измерение скорости света в других средах, в частности в воде. Действительно, если свет — это волна, то его скорость должна меняться при переходе из одной среды в другую. Более того, согласно выводу закона преломления волн при помощи принципа Гюйгенса, скорость света в воде должна быть меньше скорости света в воздухе (вакууме) примерно в 1, 3 раза. Именно такое значение имеет показатель преломления воды относительно воздуха.

Скорость света в воде была измерена впервые Ж. Фуко в 1850 г. она оказалась меньше скорости света в воздухе именно в 1,3 раза. В 1862 году Фуко применил в установке по измерению скорости света вместо зубчатого колеса вращающееся зеркало.

В его опытах зеркало совершало более 500 об/с, поэтому удалось провести измерение скорости света на установке, база которой составляла всего 20 м! Полученное Фуко значение скорости света составило (298000 ± 500) км/с .

Идея измерения малых промежутков времени при помощи вращения была использована и развита другими исследователями. В частности, наиболее точные лабораторные измерения скорости света были проведены А. Майкельсоном, который использовал вращающуюся зеркальную призму. Схема опыта Майкельсона приведена на рисунке и вы можете сами рассказать об идее этого опыта.

В настоящее время для измерения скорости света используют модернизированный метод Физо, в котором вместо зубчатого колеса используют электрооптический, дифракционный или интерференционный модулятор света, полностью прерывающий пучок света через ничтожные промежутки времени. В качестве приемника света служат чувствительные фотоэлементы, а в качестве источника света используют лазеры.

Эти измерения позволили существенно повысить точность измерения скорости света. Решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным науки и техники (КОДАТА) скорость света в вакууме принято считать равной

(299792458 ± 1) м/с.

§ 13. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Т. Юнг (1773 — 1829)

О. Френель (1788 — 1827)

Интерференция волн

1. Явление наложения волн одинаковой природы, распространяющихся в одной среде.

2. Устойчивая во времени интерференционная картина наблюдается при наложении когерентных волн.

3. Условия максимумов интерференции:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = k\lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2, \ldots$$

4. Условия минимумов интерференции:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = (2k+1)\lambda/2, \text{ где } k = 0, 1, 2, \ldots$$

5. В остальных точках среды амплитуда колебаний также остается постоянной во времени и принимает промежуточные значения от нуля до удвоенной амплитуды волн.

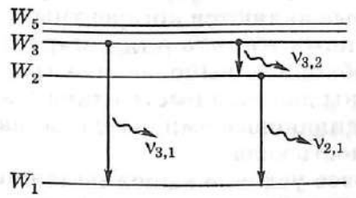
6. В результате интерференции происходит перераспределение энергии волны в пространстве.

Когерентные волны:

1. $\nu_1 = \nu_2$ — *частоты волн одинаковы.*

2. $y_{m1} = y_{m2}$ — *амплитуды волн одинаковы.*

3. $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$ — *сдвиг фаз колебаний источников волн остается постоянным во времени.*



Атом испускает свет в течение малого промежутка времени при переходе из возбужденного состояния в основное или другое возбужденное состояние

Экспериментальные наблюдения интерференции и дифракции света, а также измерение длины световой волны явились прямыми доказательствами волновой природы света.

Мы уже рассказывали в курсе физики основной школы, что наиболее важную роль в доказательстве волновой природы света играли английский физик Т. Юнг и французский физик О. Френель. Т. Юнг первым пришел к гениальной мысли о том, что переливы цвета в тонких мыльных пленках можно объяснить наложением волн (то есть их интерференцией), одна из которых отражается от наружной, а другая от внутренней поверхности пленки. А Френель не только описал общий метод получения интерференционных картин, но и применил его на практике, используя бипризму, бизеркала, билинзу Френеля.

Суть этого метода сводится к решению проблемы когерентности источников света.

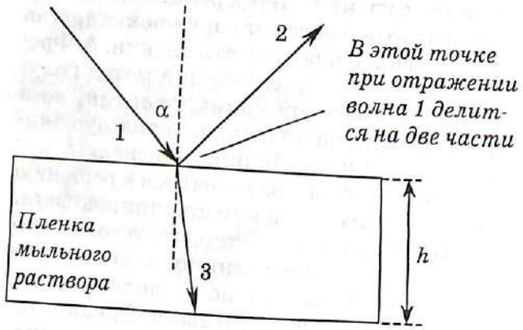
Вам хорошо известно, что устойчивую во времени интерференционную картину можно получить, только располагая когерентными источниками света. Однако, таких источников света в природе не существует. Вы помните, что свет испускают атомы химических элементов при переходе из одного возбужденного состояния в другое возбужденное или основное состояние. Таким образом, атом-источник «работает» в течение очень малого времени и испущенная им волна, строго говоря, не является гармонической. Кроме того, отдельные атомы, хотя и могут испускать свет одной и той же частоты, испускают его не согласованно, то есть разность фаз колебаний в отдельных волнах (даже имеющих одинаковую частоту) оказывается непостоянной во времени.

Френель решил проблему с источниками гениально просто: нужно одну волну разделить на две части (они-то точно когерентные!). Затем создать условия, при которых каждая часть проходит при распространении некоторое расстояние, так что волны «набирают» разность хода. Теперь остается свести их в одну область пространства, где и произойдет наложение волн, приводящее к появлению интерференционной картины.

И в тонких пленках Юнга «работает» этот же метод!

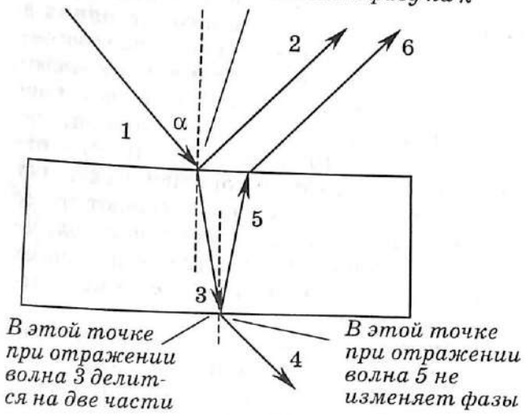
Монохроматическая волна — волна определенной частоты.

Монохроматический свет — свет определенного цвета, так как частота света определяет его цвет.



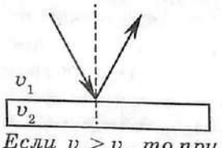
В этой точке при отражении волна 1 делится на две части

В этой точке при отражении волна 2 изменяет фазу на π

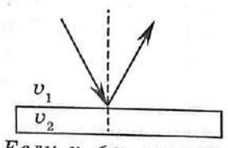


В этой точке при отражении волна 3 делится на две части

В этой точке при отражении волна 5 не изменяет фазы



Если $v_1 > v_2$, то при отражении происходит изменение фазы волны на π



Если $v_1 < v_2$, то при отражении не происходит изменения фазы

Поскольку мы совсем недавно проводили расчеты интерференционных картин для когерентных источников любой природы, то воспользуемся своими знаниями и рассмотрим конкретные ситуации интерференции световых волн. Попутно покажем способы определения длины световой волны, например, в воздухе.

Вначале будем полагать, что мы имеем дело с монохроматическим светом, то есть светом определенного цвета. Как вы знаете, цвет света определяется его частотой, которая не меняется при переходе из одной среды в другую, так как задается источником излучения.

Ситуация 1. Монохроматический свет частотой ν падает на мыльную пленку под углом α. Каким будет результат интерференции света в отраженном от пленки свете, если ее толщина равна h, а показатель преломления пленки относительно воздуха равен n?

Сначала выполним чертеж и отметим принципиальные моменты. На пленку падает волна, которую мы схематически изобразим при помощи одного луча 1.

В точке падения луча на поверхность пленки происходит расщепление волны на две части: первая испытывает отражение (луч 2), а вторая (луч 3) преломляется, доходит до внутренней поверхности пленки и в точке падения снова расщепляется на две части. Одна из этих двух частей (луч 4) испытает преломление и выйдет из пленки в воздух. Эта часть волны нас не интересует, так как нигде не сможет наложиться на другие части этой волны. Другая часть (луч 5) отразится от внутренней поверхности пленки и, дойдя до верхней поверхности, выйдет через нее, снова преломившись, в воздух(луч 6). Таким образом, в отраженном свете мы будем наблюдать две части одной волны (они изображены лучами 2 и 6), которые являются когерентными.

Вы помните, что для когерентности волн необходимо выполенение трех условий: волны должны иметь одинаковые частоты, одинаковые амплитуды и постоянную разность хода.

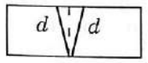
Первое условие выполняется автоматически, так как все точки в волне совершают вынужденные колебания с частотой источника. Второе условие — равенство амплитуд, вообще говоря, не выполняется. Но если толщина пленки очень мала, то мож-

ΔABO:

1. $\nu_1 = \nu_2$ — частоты волн совершенно одинаковы, так как они являются частями одной волны.

2. $y_{m1} = y_{m2}$ — амплитуды волн примерно одинаковы, если толщина пленки мала (сравнима с длиной волны света) и скорости света в средах имеют один порядок величины.

3. $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$ — сдвиг фаз колебаний источников волн остается постоянным во времени, так как толщина пленки остается постоянной и условия отражения и преломления волн не меняются со временем.



$d_6 = 2d \approx 2h$

При малых углах падения геометрический ход преломленной волны примерно равен удвоенной толщине пленки

На этом расстоянии уложится $2h/\lambda_{\text{в пленке}}$ длин волн. Но длина волны в пленке меньше длины волны в воздухе в $n = v_1/v_2$ раз:

$$\nu_1 = \nu_2 = \text{const};$$

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{\nu_1}, \qquad \lambda_2 = \frac{v_2}{\nu_2},$$

$$\nu_1 = \nu_2 = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2};$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot \frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_1}{n}$$

$$\frac{2h}{\lambda_2} = \frac{2nh}{\lambda_1} = \frac{nd_2}{\lambda_1}$$

nd_2 – оптическая разность хода.

Найдем оптическую разность хода двух волн:

$$d_6 - d_2 = 2nh - \lambda_1/2.$$

Если $2nh - \lambda_1/2 = k\lambda_1$, то наблюдаем максимум интерференции в отраженном свете:

$$2nh = k\lambda_1 + \frac{\lambda_1}{2} = (2k+1)\cdot\frac{\lambda_1}{2};$$

$$h = (2k+1)\cdot\frac{\lambda_1}{4n} = (2k+1)\cdot\frac{\lambda_2}{4}$$

Если $2nh - \lambda_1/2 = (2k+1)\lambda_1/2$, то наблюдаем минимум интерференции в отраженном свете:

$$2nh = (2k+1)\frac{\lambda_1}{2} + \frac{\lambda_1}{2} = (2k+2)\cdot\frac{\lambda_1}{2};$$

$$h = (2k+2)\cdot\frac{\lambda_1}{4n} = (k+1)\cdot\frac{\lambda_2}{2}$$

отражение от оптически более плотной среды. Следовательно, фаза волны меняется на π. Кроме того волна, распространяющаяся [illegible] проходит в нем [illegible] ции этих двух волн, нужно найти разность хода этих волн.

Разность хода волны набирают следующим образом. Так как волна 2 отражается от более плотной среды, то при отражении происходит изменение фазы на π. (Здесь мы имеем дело с тем же эффектом, что и при отражении от твердой стенки волнового импульса, распространяющегося в резиновом шнуре.)

Волна 6 набирает разность хода, проходя внутри мыльной пленки некоторое расстояние до внутренней поверхности и обратно. Это расстояние можно найти из геометрических соображений и закона преломления волн. Подсчитывая, сколько длин волн укладывается на этом пути, нужно учесть, что длина волны в мыльной пленке меньше длины волны в воздухе в n раз (n — показатель преломления).

Произведение геометрической разности хода на показатель преломления среды (в нашем случае показатель преломления пленки) называется оптической разностью хода. Если ее подсчитать, то уже не надо будет учитывать изменение длины волны в пленке (или другой среде).

Таким образом, общая разность хода двух волн 2 и 6 будет складываться из оптической разности хода волны 6 и половинки длины волны, появившейся в результате отражения волны 2 от оптически более плотной среды (в ней скорость света меньше).

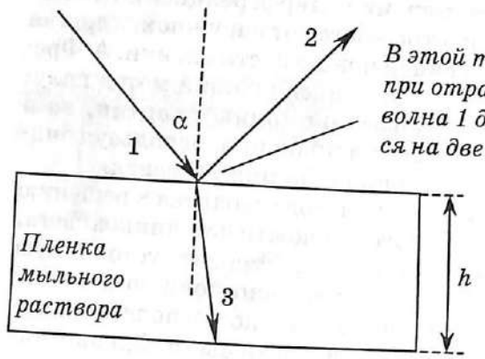
Теперь нужно применить условие максимумов или минимумов интерференции и записать их в явном виде для подсчитанной разности хода.

Полученный результат позволяет сделать очень интересный вывод. Если толщина пленки равна четверти длины падающей волны, то результатом наложения волн в отраженном свете будет максимум интерференции. Что это означает? То, что энергия, которая, как вы помните, перераспределяется в интерференционной картине, почти целиком поступает в область, откуда волна падает на пленку. В таком случае пленка будет практически непрозрачной в проходящем свете для этой длины волны.

Опираясь на полученный результат, можно придумать и такую ситуацию. Покроем поверхность стеклянной пластинки тонкой пленкой из материала оптически

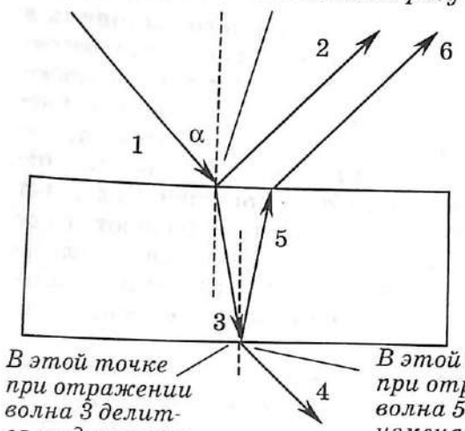
***Монохроматическая волна** — волна определенной частоты.*

***Монохроматический свет** — свет определенного цвета, так как частота света определяет его цвет.*



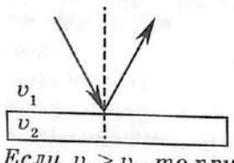
В этой точке при отражении волна 1 делится на две части

В этой точке при отражении волна 2 изменяет фазу на π

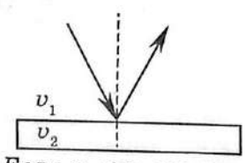


В этой точке при отражении волна 3 делится на две части

В этой точке при отражении волна 5 не изменяет фазы



Если $\upsilon_1 > \upsilon_2$, то при отражении происходит изменение фазы волны на π



Если $\upsilon_1 < \upsilon_2$, то при отражении не происходит изменения фазы

Поскольку мы совсем недавно проводили расчеты интерференционных картин для когерентных источников любой природы, то воспользуемся своими знаниями и рассмотрим конкретные ситуации интерференции световых волн. Попутно покажем способы определения длины световой волны, например, в воздухе.

Вначале будем полагать, что мы имеем дело с монохроматическим светом, то есть светом определенного цвета. Как вы знаете, цвет света определяется его частотой, которая не меняется при переходе из одной среды в другую, так как задается источником излучения.

Ситуация 1. Монохроматический свет частотой ν падает на мыльную пленку под углом α. Каким будет результат интерференции света в отраженном от пленки свете, если ее толщина равна h, а показатель преломления пленки относительно воздуха равен n?

Сначала выполним чертеж и отметим принципиальные моменты. На пленку падает волна, которую мы схематически изобразим при помощи одного луча 1.

В точке падения луча на поверхность пленки происходит расщепление волны на две части: первая испытывает отражение (луч 2), а вторая (луч 3) преломляется, доходит до внутренней поверхности пленки и в точке падения снова расщепляется на две части. Одна из этих двух частей (луч 4) испытает преломление и выйдет из пленки в воздух. Эта часть волны нас не интересует, так как нигде не сможет наложиться на другие части этой волны. Другая часть (луч 5) отразится от внутренней поверхности пленки и, дойдя до верхней поверхности, выйдет через нее, снова преломившись, в воздух(луч 6). Таким образом, в отраженном свете мы будем наблюдать две части одной волны (они изображены лучами 2 и 6), которые являются когерентными.

Вы помните, что для когерентности волн необходимо выполенение трех условий: волны должны иметь одинаковые частоты, одинаковые амплитуды и постоянную разность хода.

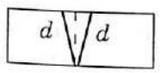
Первое условие выполняется автоматически, так как все точки в волне совершают вынужденные колебания с частотой источника. Второе условие — равенство амплитуд, вообще говоря, не выполняется. Но если толщина пленки очень мала, то можно приблизительно считать амплитуды волн 2 и 6 равными.

Волны 2 и 6 когерентны:

1. $\nu_1 = \nu_2$ — частоты волн одинаковы, так они являются частями одной волны.

2. $y_{m1} = y_{m2}$ — амплитуды волн примерно одинаковы, если толщина пленки мала (сравнима с длиной волны света) и скорости света в средах имеют один порядок величины.

3. $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$ — сдвиг фаз колебаний источников волн остается постоянным во времени, так как толщина пленки остается постоянной и условия отражения и преломления волн не меняются со временем.



$d_6 = 2d \approx 2h$

При малых углах падения геометрический ход преломленной волны примерно равен удвоенной толщине пленки

На этом расстоянии уложится $2h/\lambda_{\text{в пленке}}$ длин волн. Но длина волны в пленке меньше длины волны в воздухе в $n = \upsilon_1/\upsilon_2$ раз:

$$\nu_1 = \nu_2 = \text{const};$$

$$\lambda_1 = \frac{\upsilon_1}{\nu_1}, \qquad \lambda_2 = \frac{\upsilon_2}{\nu_2},$$

$$\nu_1 = \nu_2 = \frac{\upsilon_1}{\lambda_1} = \frac{\upsilon_2}{\lambda_2};$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = \frac{\lambda_1}{n}$$

$$\frac{2h}{\lambda_2} = \frac{2nh}{\lambda_1} = \frac{nd_2}{\lambda_1}$$

nd_2 – оптическая разность хода.

Найдем оптическую разность хода двух волн:

$$d_6 - d_2 = 2nh - \lambda_1/2 .$$

Если $2nh - \lambda_1/2 = k\,\lambda_1$, то наблюдаем максимум интерференции в отраженном свете:

$$2nh = k\lambda_1 + \frac{\lambda_1}{2} = (2k+1)\cdot\frac{\lambda_1}{2};$$

$$h = (2k+1)\cdot\frac{\lambda_1}{4n} = (2k+1)\cdot\frac{\lambda_2}{4}$$

Если $2nh - \lambda_1/2 = (2k+1)\,\lambda_1/2$, то наблюдаем минимум интерференции в отраженном свете:

$$2nh = (2k+1)\frac{\lambda_1}{2} + \frac{\lambda_1}{2} = (2k+2)\cdot\frac{\lambda_1}{2};$$

$$h = (2k+2)\cdot\frac{\lambda_1}{4n} = (k+1)\cdot\frac{\lambda_2}{2}$$

Чтобы найти результат интерференции этих двух волн, нужно найти разность хода этих волн.

Разность хода волны набирают следующим образом. Так как волна 2 отражается от более плотной среды, то при отражении происходит изменение фазы на π. (Здесь мы имеем дело с тем же эффектом, что и при отражении от твердой стенки волнового импульса, распространяющегося в резиновом шнуре.)

Волна 6 набирает разность хода, проходя внутри мыльной пленки некоторое расстояние до внутренней поверхности и обратно. Это расстояние можно найти из геометрических соображений и закона преломления волн. Подсчитывая, сколько длин волн укладывается на этом пути, нужно учесть, что длина волны в мыльной пленке меньше длины волны в воздухе в n раз (n — показатель преломления).

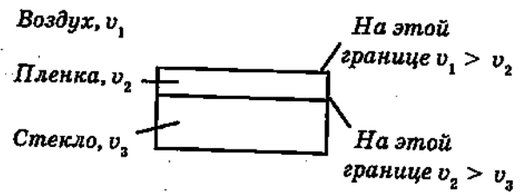
Произведение геометрической разности хода на показатель преломления среды (в нашем случае показатель преломления пленки) называется оптической разностью хода. Если ее подсчитать, то уже не надо будет учитывать изменение длины волны в пленке (или другой среде).

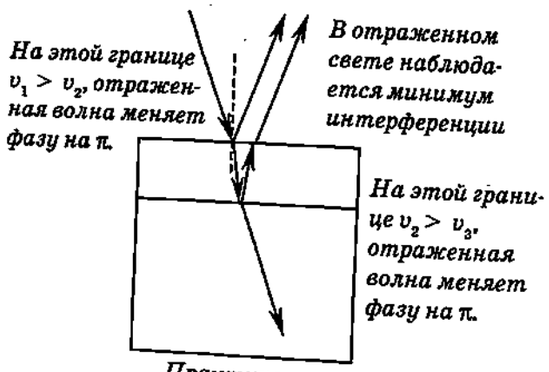
Таким образом, общая разность хода двух волн 2 и 6 будет складываться из оптической разности хода волны 6 и половинки длины волны, появившейся в результате отражения волны 2 от оптически более плотной среды (в ней скорость света меньше).

Теперь нужно применить условие максимумов или минимумов интерференции и записать их в явном виде для подсчитанной разности хода.

Полученный результат позволяет сделать очень интересный вывод. Если толщина пленки равна четверти длины падающей волны, то результатом наложения волн в отраженном свете будет максимум интерференции. Что это означает? То, что энергия, которая, как вы помните, перераспределяется в интерференционной картине, почти целиком поступает в область, откуда волна падает на пленку. В таком случае пленка будет практически непрозрачной в проходящем свете для этой длины волны.

Опираясь на полученный результат, можно придумать и такую ситуацию. Покроем поверхность стеклянной пластинки тонкой пленкой из материала оптически




На этой границе $v_1 > v_2$, отраженная волна меняет фазу на π.
В отраженном свете наблюдается минимум интерференции
На этой границе $v_2 > v_3$, отраженная волна меняет фазу на π.

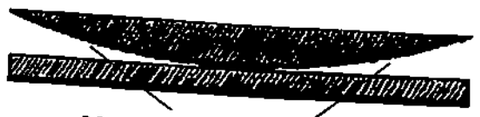
Практически весь свет проходит внутрь стекла (внутрь оптической системы)

менее плотного, чем стекло, но оптически более плотного, чем воздух. Сделаем толщину пленки равной четверти длины волны в ней. Направим на поверхность пленки свет длиной волны $n\lambda_{\text{пленки}}$. Тогда на границе раздела «воздух-пленка» отраженная часть волны изменит фазу на π. Другая часть волны войдет в пленку и на границе раздела со стеклом при отражении тоже изменит фазу на π. Это означает, что при выходе в воздух разность хода этих двух волн будет равна $2nh_{\text{пленки}} = n\lambda_{\text{пленки}}/2$, то есть в отраженном свете будет наблюдаться минимум интерференции.

Это означает, что энергия световой волны будет практически полностью направляться внутрь оптической системы, то есть потери на отражение будут сведены к минимуму.

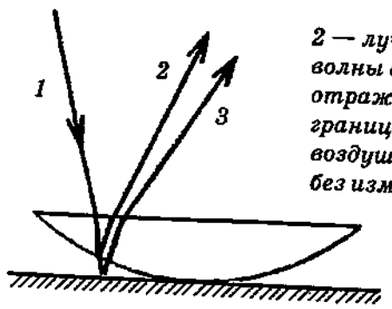
В этом состоит суть эффекта так называемой «просветленной оптики»: покрытие оптических поверхностей тонкими, в четверть длины волны, пленками предотвращает потери света на отражение в сложных оптических системах.

Ситуация 2. Рассмотрим тонкую стеклянную плосковыпуклую линзу большого радиуса R. Положим ее на горизонтальную стеклянную пластину выпуклой стороной вниз и осветим монохроматическим светом длиной волны λ, падающим на нее под очень малым углом. Описать картину, которую можно наблюдать в отраженном свете.



Между линзой и пластиной образуется тонкий воздушный зазор переменной толщины

1 — луч падающей волны длиной λ



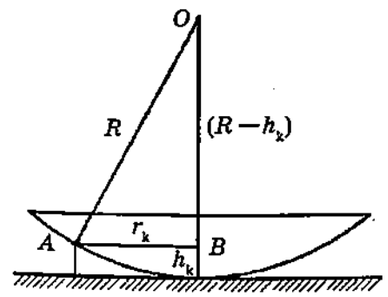
2 — луч части волны длиной λ, отраженной на границе линзы и воздушного зазора без изменения фазы

3 — луч части волны длиной λ, отраженной на границе воздушного зазора и стеклянной пластины. Здесь при отражении фаза волны меняется на π.

Теперь после того, как мы подробно рассмотрели явления в тонкой пленке, вы можете увидеть сходство обеих ситуации, если попробуете найти в новой ситуации «тонкую пленку». В данном случае роль ее будет играть тонкая прослойка воздуха между линзой и плоской стеклянной пластиной (ведь не случайно выбрана линза очень большого радиуса кривизны!).

Как и в случае тонкой пленки, нужно рассматривать явления на границах раздела этой «тонкой пленки» с другими средами. На рисунке показано, что результат интерференции можно наблюдать при наложении части волны, отраженной от границы «стекло-воздух», и другой части этой же волны, отраженной от границы «воздух-стекло».

На первой границе происходит отражение от оптически менее плотной среды, следовательно, изменения фазы волны не происходит. На второй границе происходит



ΔABO:
$\angle B = 90°$;
$|AO| = R$;
$|BO| = R - h_k$;
$|AB| = r_k$.

1. По теореме Пифагора:

$$R^2 = r_k^2 + (R - h_k)^2.$$

$R^2 = r_k^2 + R^2 - 2Rh_k + h_k^2$; $h_k \ll r_k$, поэтому остается: $r_k^2 \approx 2Rh_k$; $h_k \approx \dfrac{r_k^2}{2R}$.

2. Подсчитаем разность хода волн 2 и 3:

$$\Delta d = d_3 - d_2 = 2h_k + \frac{\lambda}{2}.$$

3. Минимумы интерференционной картины:

$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \text{ или } 2h_k + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2};$$

$$h_k = k \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \ldots$$

4. Максимумы интерференционной картины:

$$\Delta d = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ или } 2h_k + \frac{\lambda}{2} = 2k \cdot \frac{\lambda}{2};$$

$$2h_k = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, \ldots$$

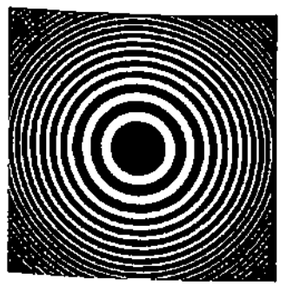
5. Определим связь между радиусом колец в интерференционной картине и длиной волны падающего света:

$h_k \approx \dfrac{r_k^2}{2R} = k \cdot \dfrac{\lambda}{2}$, $k = 0, 1, 2, \ldots$ – минимумы

$r_k^2 = kR\lambda$; $r_k = \sqrt{kR\lambda}$ – радиусы темных колец в отраженном свете.

$2h_k \approx \dfrac{r_k^2}{R} = (2k-1) \cdot \dfrac{\lambda}{2}$, $k = 1, 2, \ldots$ – максимумы

$r_k^2 = (2k-1)R\dfrac{\lambda}{2}$; $r_k = \sqrt{(2k-1)R\dfrac{\lambda}{2}}$ – радиусы светлых колец в отраженном свете.



Картина колец Ньютона в отраженном монохроматическом свете. В центре всегда темное пятно, соответствующее минимуму интерференции

отражение от оптически более плотной среды. Следовательно, фаза волны меняется на π. Кроме того волна, распространяющаяся в воздушной прослойке, проходит в нем путь, равный удвоенной толщине воздушного зазора в данном месте.

Поскольку результат интерференции мы наблюдаем в отраженном свете в воздухе, а дополнительную разность хода волна 3 набирает также в воздухе, то оптическая и геометрическая разность хода в данном случае совпадают.

Значит, остается подсчитать разность хода и сравнить ее с длиной волны света в воздухе. Геометрические построения выполнены на следующем рисунке, рядом приведены соответствующие выкладки.

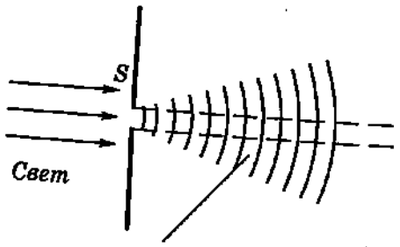
Они показывают, что радиус k-го темного кольца (минимум интерференционной картины) равен квадратному корню из произведения длины волны, радиуса линзы и порядка интерференции. Радиус k-го светлого кольца (максимум интерференции) — корню квадратному из произведения радиуса линзы, половины длины волны и числа $(2k + 1)$, определяющего порядок интерференции.

Никто из вас не сомневается в том, что интерференционная картина в случае «идеальной» поверхности линзы симметрична и имеет вид концентрических кругов: светлые, имеющие цвет, соответствующий длине волны падающего на линзу света — максимумы интерференции, чередуются с темными, то есть минимумами интерференционной картины.

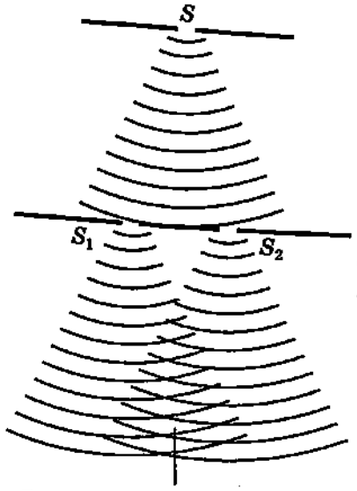
Интересно, что такую картину в свое время подробно описал Ньютон. Вспомните, он был сторонником корпускулярной теории света, поэтому объяснить данную картину не мог. Но изучая данное явление, обнаружил все (!) ее закономерности. В частности, он установил, что расстояния между соседними кольцами быстро убывают по мере увеличения их радиуса. Радиусы колец растут пропорционально квадратному корню из порядкового номера кольца. Наконец, радиусы колец одного порядкового номера, но разного цвета, увеличиваются при переходе от фиолетового (самый маленький радиус колец) к красному концу спектра белого света.

Заметим, что полученные формулы позволяют вычислить длину световой волны в воздухе для данного цвета света, а по ней и скорости света рассчитать частоту.

§ 14. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА



Из-за дифракции свет попадает в область геометрической тени экрана (показана пунктиром)



Отверстия в этом экране «выделяют» две части одной волны. Эти две волны — когерентные.

В этой области пространства происходит наложение двух когерентных волн, следовательно, можно наблюдать интерференционную картину.

Другое явление, присущее только объектам, имеющим волновую природу — дифракция или огибание волной преграды. Как вы помните, это явление происходит всегда, когда на пути волны появляется преграда. Обнаружить его можно, наблюдая, что волна «заходит» в область геометрической тени преграды.

Если размеры преграды велики, то обнаружить волны в области геометрической тени можно только на большом расстоянии от преграды. Обычно, мы этого не делаем, так как наблюдения проводим в непосредственной близости от преграды. В этом случае явление дифракции явно обнаруживает себя, если размеры преграды сравнимы с длиной волны.

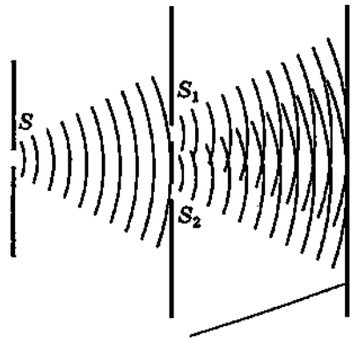
Если обратиться к свету, то для наблюдения дифракции понадобятся преграды, размеры которых сравнимы с длиной световой волны. А она очень мала и составляет примерно $5{,}5 \cdot 10^{-5}$ см. Очевидно, что даже если мы «найдем» преграду такого размера, проводить наблюдение дифракции все равно будет чрезвычайно затруднительно. Поэтому Т. Юнг, открывший явление интерференции, использовал его для обнаружения дифракции света.

Сегодня ход рассуждений, приводящий к такому опыту, можно было бы провести примерно так.

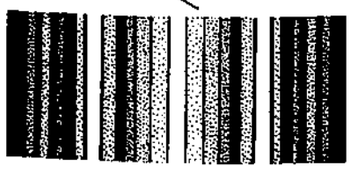
Допустим, что будем наблюдать интерференцию двух волн, являющихся частями одной волны. Поскольку мы хотим обнаружить дифракцию световых волн, надо быть уверенным в том, что эти две волны (о которых говорилось выше) «появились» в той части пространства, которая находится в области геометрической тени источника волны и, если явления дифракции не было бы, то и явление интерференции не наблюдалось бы.

Посмотрите на рисунки. Отверстие S в первом экране находится как раз напротив середины отрезка S_1S_2, образованного отверстиями во втором экране. Отверстия S_1 и S_2 лежат в области геометрической тени первого экрана. Если дифракция не присуща свету, то за вторым экраном света не будет и третий экран (см. след. стр.) будет одинаково темным во всех точках.

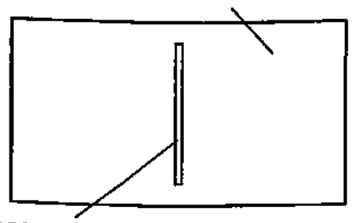
Если же свет заходит в область геометрической тени, то он может «попасть» в отверстия S_1 и S_2. Тогда мы получим две части одной волны (то есть две когерентные волны) и в области их наложения сможем наблюдать интерференционную картину.



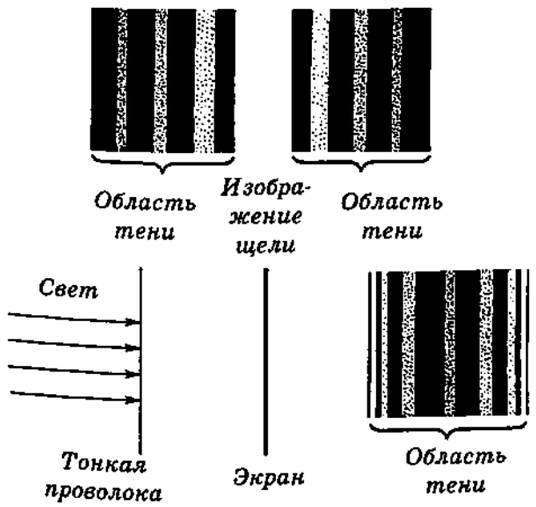
На этом экране наблюдают такую интерференционную картину



Непрозрачный экран



Так выглядит дифракционная картина на экране, расположенном напротив щели



В своих опытах Юнг прокалывал булавкой отверстия S_1 и S_2 в непрозрачных ширмах. Сегодня для получения более интенсивной картины на экране в экранах проделывают параллельные щели. Через щели проходит значительно больше света, но суть опыта от этого не меняется.

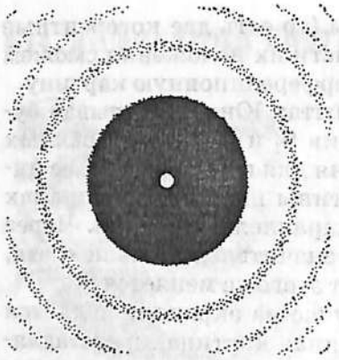
В этом случае на экране появляется интерференционная картина, представляющая собой чередование параллельных щелям темных и светлых полос. В центре картины расположена светлая полоса, а по разные стороны от нее получаются симметричные картины.

Мы с вами уже рассчитывали подобную интерференционную картину для случая механических волн (см. §7). Там мы установили, что расстояние от центрального максимума до минимума (или максимума) некоторого порядка в интерференционной картине зависит от длины волны, расстояния между источниками и расстояния до экрана. Все расстояния в этом опыте можно измерить. Это позволит рассчитать длину световой волны. Именно в этом опыте Юнг впервые (и весьма точно!) вычислил длины волн, соответствующих свету разного цвета.

Исследование дифракции получило свое дальнейшее развитие в работах О. Френеля, который построил количественную теорию дифракции, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн.

Действительно, принцип Гюйгенса утверждает, что все точки среды, до которых дошло волновое движение, становятся источниками вторичных сферических волн. Естественно предположить, что эти источники волн — когерентные, ведь их частота и амплитуда одинаковы, колебания у этих источников происходят в одинаковой фазе, ведь они лежат на одной волновой поверхности. Теперь остается сделать естественный (для нас с вами, живущих в XXI веке!) вывод: если в пространстве распространяется несколько когерентных волн, то в результате их интерференции возникает устойчивая интерференционная картина в которой определенным образом перераспределяется энергия.

Этот результат интерференции и определяет дальнейшее распространение волно-



Пятно Пуассона — светлое пятно расположено в центре геометрической тени круглой пластины

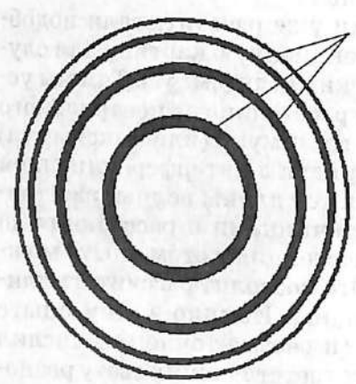
вого фронта и другие возможные эффекты. Явление интерференции позволяет рассчитать амплитуду и фазу колебаний в каждой точке пространства. Вот Френель и предложил сравнительно простой (если учесть, что источников-то вторичных волн очень много!) способ расчета таких интерференционных картин. Этот метод известен в науке как метод построения зон Френеля.

Явление дифракции света получило широкое применение в разнообразных оптических приборах. Один из них — так называемая зонная пластинка, которая действует наподобие собирающей линзы.

Зонная пластинка — это обычный экран с чередующимися прозрачными и непрозрачными для света кольцами. С точки зрения «здравого смысла» через такой экран «должно пройти меньше света», чем в его отсутствии, ведь часть светового потока перекрывается (поглощается) непрозрачными кольцами. На самом же деле в точке B интенсивность света увеличивается! Как это происходит? Вспомните, результат интерференции вторичных волн в данной точке может приводить к усилению, а может — и к ослаблению колебаний, ведь он зависит от разности хода волн, пришедших в данную точку.

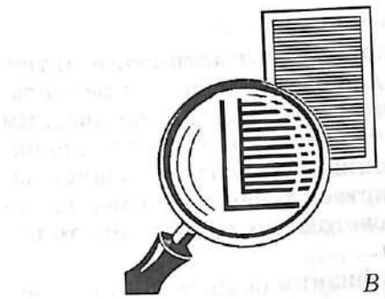
Все источники вторичных волн посылают волны в данную точку, и результат колебаний в ней определяется их совместным действием. Представьте себе, что мы создали такую пластинку, которая «не пропускает» в данную точку B те волны, которые приводят к ослаблению колебаний, а пропускают только те, которые в данную точку приходят в одинаковой фазе. Вот так и устроена зонная пластинка: темные кольца перекрывают те направления, по которым от данного источника света S в точку B идут волны, приводящие к ослаблению света. Зонные пластинки способны фокусировать световые лучи, давать изображения предметов. Они хорошо работают и там, где обычные стеклянные линзы оказываются бессильными, например, в рентгеновских микроскопах, которые по своей разрешающей способности намного превышают оптические.

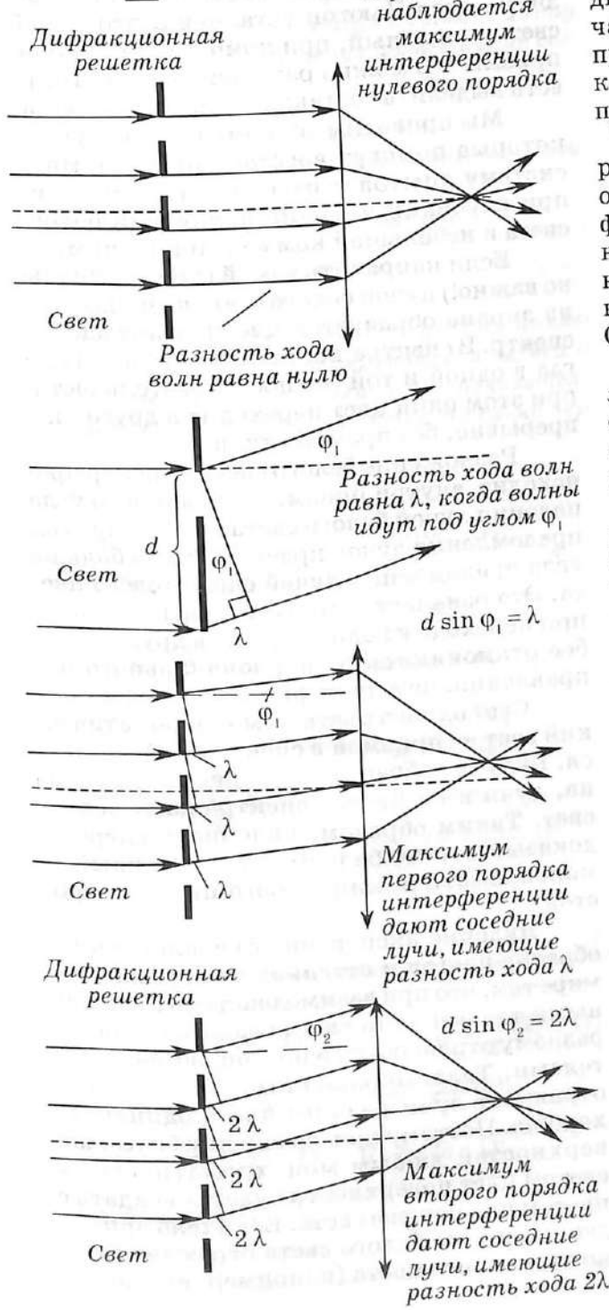
Другое важное оптическое устройство, в принципе действия которого лежит явление дифракции, так и называется «дифракционная решетка». Она представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками. Хорошая дифракционная решетка изготавливается при помощи специальных устройств, наносящих на стеклянную пластину параллельные непрозрачные штрихи. Обычно число штрихов на 1 мм длины достигает нескольких тысяч, а общее число штрихов на всей дифракционной решетке может превышать 100000!



Через эти непрозрачные участки зонной пластинки не проходят волны, которые в некоторых точках пространства приводят к ослаблению колебаний

Так можно наблюдать дифракцию на щели, не прибегая к сложным устройствам





С таких «настоящих» решеток делают желатиновые слепки, помещают их между двумя стеклянными пластинками и получают сравнительно дешевые, но вполне пригодные в большинстве случаев оптические приборы. Такие решетки работают в проходящем свете.

Наилучшим качеством обладают дифракционные решетки, которые работают в отраженном свете. В этом случае на отшлифованную до зеркального блеска пластину наносят специальным резцом параллельные штрихи, рассеивающие свет. (Подобный эффект вы неоднократно наблюдали на CD-дисках).

Главной характеристикой решетки является ее **период**. Это расстояние равное сумме ширины прозрачной щели и ширины непрозрачного промежутка. Обычно период решетки обозначают буквой d.

Если решетка содержит N щелей, то за решеткой интерферируют N когерентных световых волн. Строгие теоретические расчеты позволяют определить, под какими углами φ к направлению распространения падающей на решетку плоской волны находятся максимумы интерференции.

На рисунках показан ход лучей, усиливающих друг друга при наложении.

Положение этих максимумов не зависит от числа щелей. Оно зависит от периода решетки и длины волны падающего света и определяются следующим условием:

$$d\sin\varphi = k\lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2, \ldots$$

С помощью дифракционной решетки можно производить очень точные измерения длины световой волны. Для этого измеряют угол (или соответствующие отрезки прямых) дифракции определенного порядка.

Дифракционная решетка является главной составной частью современных спектральных приборов, при помощи которых проводятся исследования спектров излучения и поглощения разных объектов — от галактик и звезд до молекул и атомов разных химических элементов.

§ 15. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

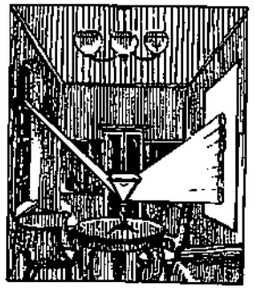


Рисунок установки, при помощи которой можно наблюдать дисперсию солнечного (белого) света

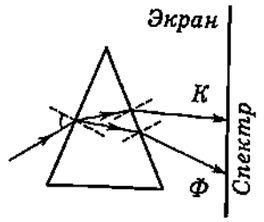
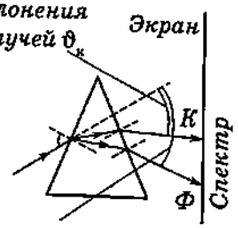


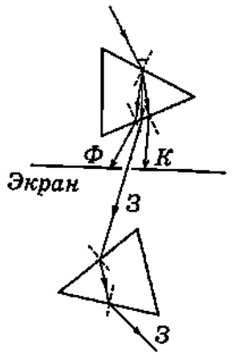
Схема хода лучей узкого пучка белого света в стеклянной призме



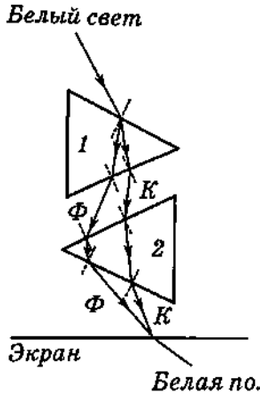
Угол отклонения красных лучей $\vartheta_к$

$\vartheta_к < \vartheta_ф$

Угол отклонения фиолетовых лучей $\vartheta_ф$



Монохроматический свет, проходя через призму, в спектр не разлагается



Белая полоска

Если при помощи призмы все цветные лучи спектра белого света собрать в одно место на экране, то образуется белая полоска света

До сих пор мы рассматривали интерференцию и дифракцию света, предполагая, что имеем дело с монохроматическим излучением, то есть с волнами вполне определенной длины. Однако в реальной жизни, в большинстве случаев, мы имеем дело с солнечным светом, который принято называть белым.

Из курса физики основной школы вы знаете, что Ньютон установил, что белый свет — сложный, при помощи стеклянной призмы его можно разложить в спектр, то есть выделить составляющие белого света.

Мы приводим знакомые вам рисунки, которые помогут восстановить в памяти систему опытов и рассуждений Ньютона при изучении явления дисперсии белого света и небольшой комментарий к ним.

Если направить узкий (принципиально важно!) пучок белого света на призму, то на экране образуется цветная полоска — спектр. В спектре цвета располагаются всегда в одной и той же последовательности, при этом один цвет переходит в другой непрерывно, без промежутков.

Разложение белого света в спектр происходит внутри призмы: для данного угла падения лучей белого света на призму угол преломления лучей красного цвета больше угла преломления лучей фиолетового цвета. Это означает, что лучи красного цвета при переходе из одной среды в другую слабее отклоняются от первоначального направления, чем лучи фиолетового цвета.

Свет одного цвета — монохроматический свет — призмой в спектр не разлагается. Будучи собранными в одно место экрана, лучи всех цветов спектра дают белый свет. Таким образом, явление дисперсии доказывает, что белый свет — сложный, а монохроматический любого цвета — простой.

Явление дисперсии объясняет многообразие цветов и оттенков в окружающем мире тем, что при взаимодействии с различными телами лучи света разного цвета поразному отражаются и поглощаются этими телами. Тела, окрашенные в белый свет, отражают лучи разного цвета одинаково хорошо. Поэтому при освещении белых поверхностей любым монохроматическим светом цвет поверхности будет совпадать с цветом падающего света. Если тело при падении на него белого света отражает только свет одного цвета (например, красный), то поверхность этого тела — красная. Она будет иметь такой цвет и при освещении ее красным светом и будет казаться черной, если ее освещать любым другим монохроматическим светом.

В своем трактате «Оптика» Ньютон так определил суть явления дисперсии: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости». То есть говоря современным языком, показатель преломления стекла (или другой среды, кроме вакуума) зависит от цвета света.

Рассмотрим явление дисперсии с позиций волновой природы света.

Данное явление обнаруживается в процессе преломления света. Преломление, в свою очередь, происходит из-за того, что меняется скорость волн (в данном случае световых) при переходе из одной среды в другую. Следовательно, разная «степень преломляемости» связана с разной скоростью распространения света разного цвета в данной среде.

В дисперсии света наблюдается закономерность: лучи красного света в любой среде (кроме вакуума) при данном угле падения преломляются слабее (то есть угол преломления большой), чем все остальные (у них углы преломления меньше), следовательно, скорость распространения света красного цвета в любой среде наибольшая.

Таким образом, явление дисперсии позволяет сделать вывод о том, что скорости света разного цвета во всех средах, кроме вакуума, различны и установить соотношение между ними, но не позволяет сделать вывод о том, одинаковы или различны длины волн разных цветов. Поэтому, чтобы установить, какой свет (красный или фиолетовый) имеет в данной среде большую длину волны, нужно обратиться к явлениям интерференции и дифракции, которые «чувствительны» именно к длине волны.

Вернемся к опытам с кольцами Ньютона. Помните, Ньютон установил, что радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются от фиолетового конца спектра к красному? Что это означает? Запишем полученную нами формулу для радиуса светлого кольца k-го порядка красного и фиолетового света и сравним их длины волн между собой.

Несложные преобразования показывают, что длина волны красного света в воздухе (и вообще в любой другой среде) больше длины волны фиолетового света.

Дисперсия света

1. Явление разложения белого света в спектр при помощи призмы.
2. Порядок следования цветов в спектре всегда один и тот же.
3. Происходит из-за того, что показатель преломления среды зависит от цвета света.
4. Доказывает, что белый свет — сложный, а любой монохроматический — простой.
5. Позволяет объяснить цвет прозрачных и непрозрачных тел избирательностью к цвету света процессов поглощения и отражения света телами.

Преломление света

1. Наблюдается при переходе волны из одной среды в другую.
2. Выполняется закон преломления:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

где α *— угол падения луча;* β *— угол преломления луча;* v_1, v_2 *— скорость волны в первой и второй среде соответственно;* n *— показатель преломления второй среды относительно первой.*

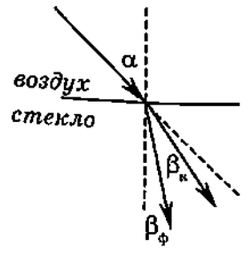
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta_к} = \frac{v_1}{v_{2к}} = n_к; \qquad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta_ф} = \frac{v_1}{v_{2ф}} = n_ф;$$

$$\beta_к > \beta_ф$$

$$\sin\beta_к > \sin\beta_ф;$$

$$\frac{v_1}{v_{2к}} < \frac{v_1}{v_{2ф}};$$

$$v_{2к} > v_{2ф}$$



Теоретические рассуждения показывают:

$$r_{k,к} = \sqrt{R\frac{\lambda_к}{2}(2k+1)}; \qquad r_{k,ф} = \sqrt{R\frac{\lambda_ф}{2}(2k+1)};$$

$$r_{k,к} > r_{k,ф} \ (\textit{опытный факт});$$

$$R\frac{\lambda_к}{2}(2k+1) > R\frac{\lambda_ф}{2}(2k+1);$$

следовательно, $\lambda_к > \lambda_ф$.

В любой среде:

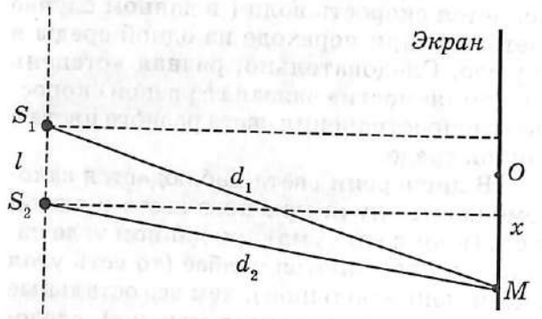
$$\nu_к = \frac{v_к}{\lambda_к}; \qquad \nu_ф = \frac{v_ф}{\lambda_ф};$$

В вакууме или в воздухе:

$$\nu_к = \frac{c}{\lambda_к}; \qquad \nu_ф = \frac{c}{\lambda_ф};$$

$\lambda_к > \lambda_ф$, *следовательно,* $\nu_к < \nu_ф$.

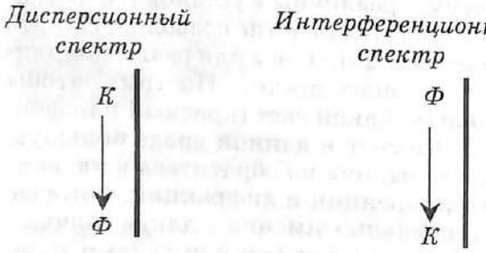
Если S_1 и S_2 — источники белого света, то в точке M наблюдается максимум интерференции только света определенного цвета. При этом имеет место следующее:



$$x_{k,к} = \frac{k\lambda_к L}{l}; \qquad x_{k,ф} = \frac{k\lambda_ф L}{l};$$

$$\lambda_к > \lambda_ф,$$

$$x_{k,к} > x_{k,ф}.$$



Если на дифракционную решетку падает белый свет, то под углом φ наблюдается максимум интерференции для света определенного цвета. При этом имеет место следующее:

$$d\sin\varphi_{k,к} = k\lambda_к; \qquad d\sin\varphi_{k,ф} = k\lambda_ф;$$

$$\lambda_к > \lambda_ф;$$

$$\sin\varphi_{k,к} > \sin\varphi_{k,ф};$$

$$\varphi_{k,к} > \varphi_{k,ф}.$$

Теперь нужно сделать выводы относительно частоты света разного цвета. Мы знаем, что длина волны связана с частотой и скоростью волны в данной среде.

Воспользуемся тем фактом, что в вакууме (и в воздухе) свет всех цветов распространяется с одной скоростью. Если бы это было не так, то при наблюдении, например, момента выхода из затмения спутника Ио мы сначала видели бы свет красного цвета, а при погружении его в тень — фиолетового. Значит, можно утверждать, что так как в вакууме (и в воздухе) длина волны света красного цвета больше длины волны света фиолетового цвета, то его частота меньше частоты фиолетового света.

Теперь мы можем суммировать свои знания о свете как о волне. Естественный свет — белый солнечный свет — сложный, представляет собой совокупность монохроматических волн, имеющих разные частоты и распространяющихся в вакууме с одинаковой скоростью $c = 300000$ км/с.

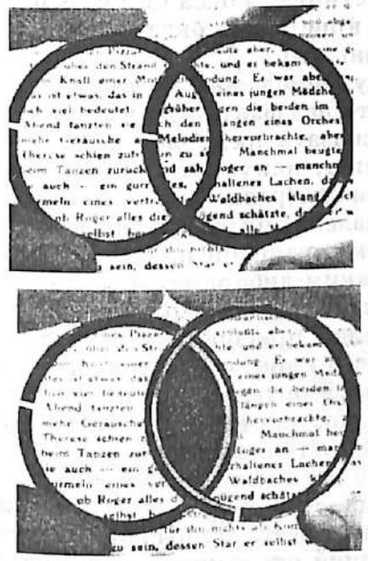
Цвет света определяется его частотой. Частота света разного цвета увеличивается, а длина волны — уменьшается при переходе от красного цвета к фиолетовому.

При переходе из вакуума в другие среды скорость света разных цветов всегда уменьшается, но меняется при этом по-разному: у красного света скорость в данной среде больше, чем у света других цветов. Соответственно, длина волны красного света в любой среде больше длины волны света любого другого цвета в той же среде.

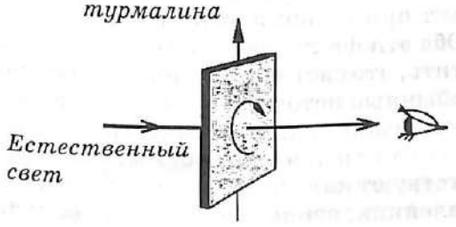
По этой причине, когда в опытах по интерференции света используется белый свет, интерферировать между собой будут волны одинаковой частоты, то есть одного цвета. **А так как длины волн разного цвета различны, то условия максимумов интерференции будут выполняться в разных точках пространства для красного и фиолетового света.**

Поэтому белый свет при интерференции тоже будет разлагаться в спектр. Но в отличие от дисперсионного спектра наибольшее отклонение от первоначального направления будут испытывать лучи красного света, так как имеют наибольшую длину волны. По этой же причине при дифракции лучи красного света будут сильнее отклоняться в область геометрической тени, чем фиолетовые. Поэтому в дифракционном спектре последовательность цветов будет такой же как и в интерференционном.

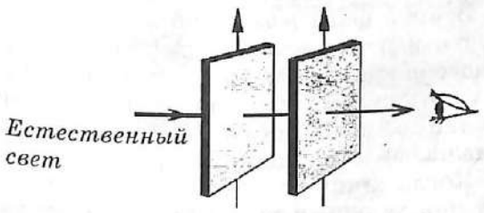
§ 16. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА



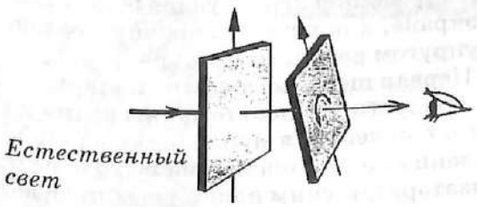
Ось симметрии кристалла турмалина



Оси симметрии кристаллов турмалина параллельны



Оси симметрии кристаллов турмалина не параллельны



Явления интерференции и дифракции света убедительно продемонстрировали, что свет обладает свойствами волны. Остается обсудить вопрос о том, какие это волны — продольные или поперечные.

На самом деле вы знаете ответ на этот вопрос, так как в основной школе мы уже ссылались на явление поляризации света как на явление, позволяющее установить поперечность световых волн. Теперь рассмотрим это явление более подробно.

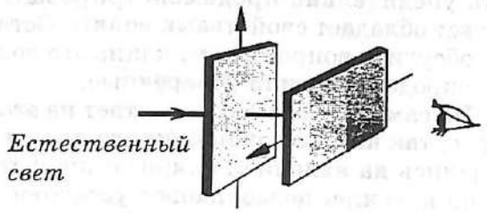
Интересно, что основатели волновой оптики Т. Юнг и О. Френель считали световые волны продольными, как и звуковые. Ведь они полагали, что свет распространяется в особой упругой среде — эфире. Поскольку эфир заполняет все пространство и не оказывает сопротивления движению тел в нем, то по своим свойствам он не может быть твердым телом. Следовательно, световые волны, по их мнению, не могут быть поперечными.

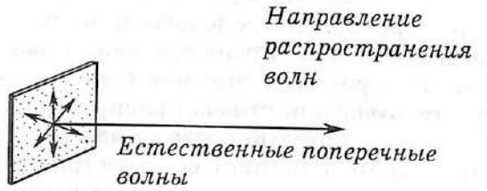
Однако постепенно в науке о свете накапливались факты, объяснить которые в рамках этой гипотезы было невозможно. К их числу относятся опыты с кристаллами турмалина.

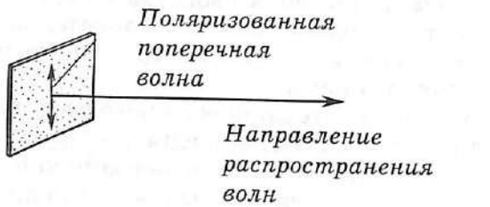
Кристаллы турмалина — прозрачные кристаллы зеленоватого цвета. Если вырезать из такого кристалла пластину так, чтобы она была параллельна его оси, и направить на нее свет от какого-либо источника, то свет пройдет через эту пластину и слегка окрасится в зеленый свет. Как бы мы не поворачивали эту пластину в плоскости, перпендикулярной лучу, свет через нее проходит практически без изменения интенсивности.

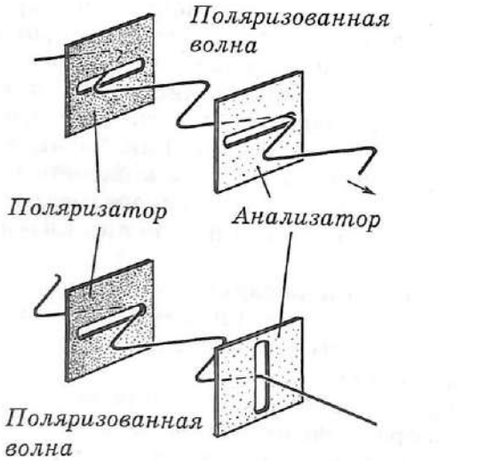
На взгляд непосвященного свет, прошедший через турмалин, совсем не изменил своих свойств, только слегка окрасился. Однако это не так.

Проходя через пластинку турмалина, свет приобрел новые свойства. Обнаружить их можно, если дать возможность свету проходить через другую такую же пластинку. В этом случае обнаруживаются следующие факты. Первый факт: если обе пластинки из турмалина ориентированы в пространстве одинаково (оси кристаллов направлены одинаково), то свет проходит через две пластины чуть-чуть изменив свою интенсивность за счет поглощения света турмалином. Второй факт состоит в том, что при вращении второй пластинки свет

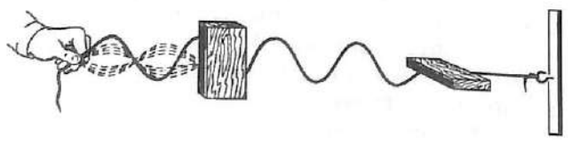








Механическая модель поляризации



начинает «гаситься» и практически полностью перестает проходить через прозрачные пластинки, когда они скрещены (то есть оси кристаллов оказываются перпендикулярными).

Задумаемся, как можно интерпретировать эти два факта. Первый факт позволяет высказать предположение, что световые волны, испускаемые источником, симметричны (равновероятны) относительно направления их распространения. Именно поэтому вращение пластинки не приводило к каким-либо заметным изменениям.

Однако пройдя через пластинку, световые волны приобретают новое свойство. Оно состоит в том, что количество прошедшего через вторую пластинку света зависит от того, как она повернута относительно первого кристалла (второй факт!).

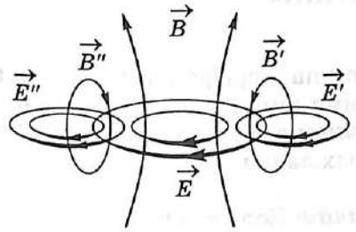
Если допустить, что свет — продольная волна, то в этом случае испущенные источником света волны обладают полной симметрией относительно направления распространения, которое оказывается осью симметрии. Поэтому объяснить второй факт при помощи этой модели не удается. Оба эти факта легко объяснить, если допустить, что световые волны поперечные и что обычные источники света (такие как Солнце, лампа накаливания, электрическая дуга и др.) испускают волны, в которых присутствуют колебания во всевозможных направлениях, перпендикулярных направлению распространения волн.

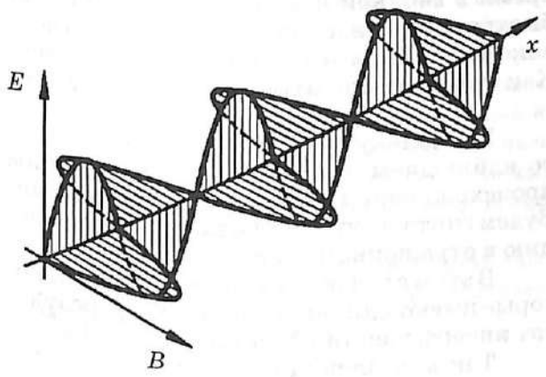
В этом случае поперечные волны обладают осевой симметрией. Такие световые волны можно назвать естественными.

Второй факт можно объяснить, если допустить, что кристалл турмалина обладает способностью пропускать только те волны, у которых колебания происходят в определенной плоскости. Такая световая волна называется поляризованной.

Когда кристаллы скрещены, то есть угол между осями равен 90°, то световая волна не проходит через вторую пластину. На рисунке показана механическая модель рассматриваемого явления. Роль пластинок из турмалина играет узкая щель в плоском экране, а поперечные волны создаются в упругом резиновом шнуре.

Первая щель, назовем ее **поляризатором**, пропустит только те волны в шнуре, в которых колебания происходят вдоль направления щели. Значит, на выходе из поляризатора получим поляризованную волну. Ее пропустит вторая щель, если она параллельна щели поляризатора. Но стоит расположить щели перпендикулярно друг другу, и волна не пройдет через **анализатор** (так принято называть второй кристалл турмалина).





Фотографии сделаны в поляризованном свете

Если теперь обратиться к гипотезе Максвелла, который предположил, что свет — это электромагнитная волна, то сразу решаются две проблемы. Во-первых, опыты по поляризации света становятся понятными.

Во-вторых, отпадает необходимость в существовании «светоносного эфира», ведь для распространения электромагнитных волн никая среда не нужна.

В световой волне, как в электромагнитной, колебания векторов напряженности и индукции электромагнитного поля происходят в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волн.

В естественном свете нет выделенного направления колебаний (то есть обладающего какими-то преимуществами перед другими) векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$, которые перпендикулярны друг другу. Если свет поляризован, то колебания $\vec{E}$ и $\vec{B}$ происходят не во всех возможных плоскостях, а только в двух определенных плоскостях. На рисунках, которые обычно приводят в качестве иллюстрации электромагнитной волны, изображают именно поляризованную волну.

Специальные опыты показали, что на сетчатку глаза, на фотоэмульсию и другие вещества действует именно электрическая компонента световой волны (магнитная сила в обычных условиях значительно меньше электрической). В связи с этим за направление колебаний в световой волне принимают направление вектора напряженности электромагнитной волны.

Способностью поляризовать свет обладают многие вещества, в частности — поляроиды. Так называют тонкие пленки (толщиной в 0,1 мм) кристаллов герапатита, которые наносят на обычное стекло.

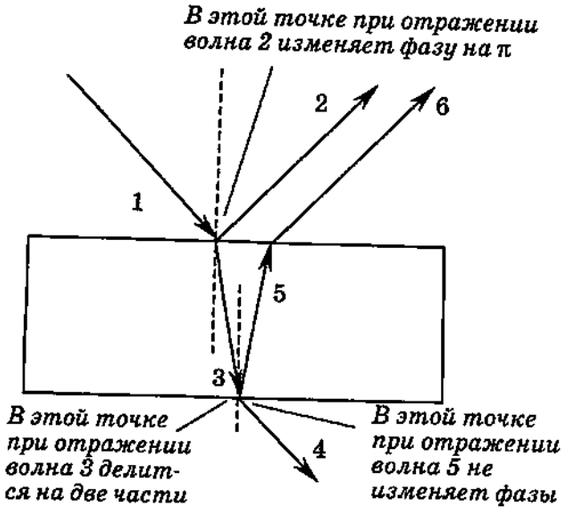
Изучение явления поляризации позволило обнаружить, что свет частично поляризуется при преломлении и при отражении света от поверхности воды и диэлектриков, то есть образуется смесь естественного и плоскополяризованного света.

Поляроиды нашли широкое применение в дефектоскопии, фотографии, на автомобильном транспорте.

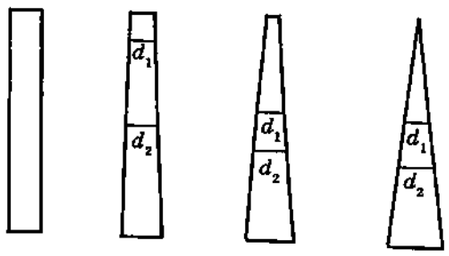
§ 17. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА»

Качественные задачи

Как обычно решение задач нужно сопровождать построением чертежей или рисунков, которые помогут сделать рассматриваемую ситуацию более наглядной. Поэтому воспроизведем рисунок, объясняющий образование интерференционной картины в тонкой пленке.


В этой точке при отражении волна 2 изменяет фазу на π
1
2
6
5
3
4
В этой точке при отражении волна 3 делится на две части
В этой точке при отражении волна 5 не изменяет фазы

Теперь изобразим профиль тонкой вертикальной пленки в разные моменты времени



Полосы равной толщины сбегают вниз по мере стекания пленки.

Условие образования темного пятна — это условие минимума интерференции волн первого порядка:

$$2d = \lambda_{\text{фиолет}}$$

Для всех $d < \lambda_{\text{фиолет}}/2$, *будет наблюдаться минимум интерференции, то есть темное пятно.*

Пленка рвется в верхней части, когда достигнет предельно малой толщины.

В этом параграфе мы приведем примеры решения типовых задач по изученной теме. Начнем с обсуждения некоторых качественных задач.

Задача 1. Если тонкую мыльную пленку расположить вертикально, то интерференционные полосы с течением времени будут перемещаться вниз, одновременно изменяя свою ширину. Через некоторое время в верхней части пленки возникает быстро увеличивающееся темное пятно и вскоре после этого пленка разрывается. Как можно объяснить описанные явления?

Поскольку речь идет о тонкой пленке, то наблюдаемая картина обязана своим происхождением явлению интерференции. Будем считать, что наблюдаем интерференцию в отраженном свете.

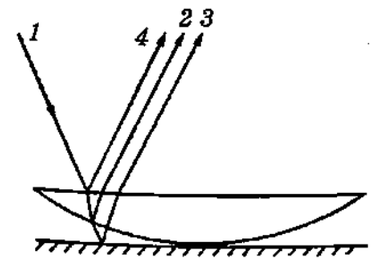
В этом случае в тех местах пленки, которые имеют одинаковую толщину, результат интерференции будет одинаковым.

Так как пленка находится в поле тяготения Земли, а жидкости текучи, то мыльный раствор будет стекать вниз. Это означает, что толщина пленки в любой момент времени меньше в ее верхней части.

Наиболее вероятным является то, что вдоль любой горизонтали толщина пленки одинакова, поэтому картина интерференции будет иметь вид полос параллельных верхнему краю пленки.

Так как толщина пленки вверху все время уменьшается, а внизу увеличивается, то разность хода волн, отраженных от внешней и от внутренней поверхностей пленки, все время меняется, а следовательно, меняется и положение максимумов и минимумов интерференции вдоль вертикального направления. Это и воспринимается глазом, как движение полос вниз.

Образование темного пятна в верхней части пленки можно объяснить так. До тех пор, пока удвоенная толщина пленки равна нечетному числу длин полуволн любого цвета, наблюдается максимум интерференции. Как только удвоенная толщина пленки станет меньше половины длины волны фиолетового света, в верхней части будет наблюдаться только минимум интерференции: темное пятно. Пленка разрывается, так как ее толщина чрезвычайно мала.



Обозначим E_2, E_3 *и* E_4 *амплитудные значения вектора напряженности в световых волнах 2, 3 и 4 соответственно.*

$E_2 << E_4$, $E_3 << E_4$, *так как волны 2 и 3 дважды проходят линзу, толщина которой велика, а волна 4 распространяется только в воздухе. Следовательно, волны 4 и 2 и волны 4 и 3, хотя и имеют равные частоты и постоянный во времени сдвиг фаз, некогерентны. Следовательно, наблюдается интерференция когерентных волн 2 и 3. Волна 4 на характер интерференционной картины не влияет.*

Благодаря этой волне мы можем видеть плоскую границу линзы, а на ее фоне — интерференционные кольца.

Задача 2. Почему кольца Ньютона образуются только вследствие интерференции лучей 2 и 3, отраженных от границ воздушной прослойки между линзой и стеклом, а луч 4, отраженный от плоской поверхности линзы не влияет на характер интерференционной картины?

При рассмотрении ситуаций, в которых может наблюдаться явление интерференции, важно устанавливать когерентность волн, распространяющихся в данной области пространства.

Условие когерентности включает два пункта: равенство частот и постоянство сдвига фаз колебаний источников.

Волны 2, 3 и 4 являются «частями» волны 1, то есть они — когерентны.

Но амплитуда волны 4 значительно больше амплитуды волн 2 и 3. Амплитуды волн 2 и 3 примерно одинаковы, так как в линзе они проходят примерно один и тот же путь, а разность хода 3 волна набирает при прохождении воздушного зазора и при отражении от стеклянной пластины.

Следовательно, наблюдается интерференция волн 2 и 3.

Задача 3. Почему красный свет рассеивается туманом меньше, чем свет другого цвета?

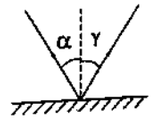
Уточним смысл термина «рассеивание». Это слово обозначает «изменение первоначального направления».

Теперь на языке физики разъясним, что такое «туман». Это мельчайшие капельки воды, которые находятся в воздухе во взвешенном состоянии и расположены хаотично. В среднем, в больших (по сравнению с размерами капелек) объемах воздуха содержится примерно одинаковое число капель. Если же выбирать малые объемы, то можно обнаружить «флуктуации» (то есть отклонения от среднего значения) плотности капель.

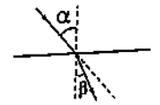
При распространении света в тумане существенным оказываются явления отражения и огибания светом преград в виде скоплений капелек воды. Наибольшей длиной волны обладает свет красного цвета и в большинстве случаев он распространяется, «не замечая» преграду, то есть рассеивается слабо. Волны, имеющие меньшую длину, испытывают отражения от скоплений капелек, поэтому рассеиваются сильнее.

При взаимодействии волны с преградой (размером d) происходят следующие явления:

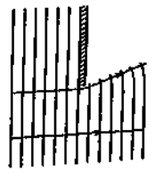
1. Отражение
(направление распространения меняется сильно).



2. Преломление
(направление распространения меняется не слишком сильно).



3. Дифракция
(направление распространения меняется по-разному в зависимости от размеров преграды и длины волны).



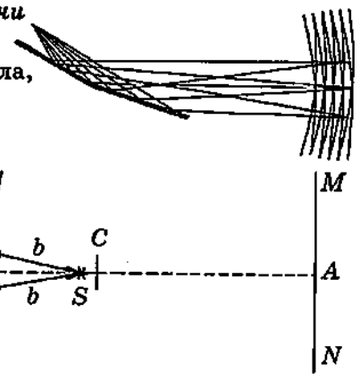
$\lambda_{\text{кр}} > \lambda_{\text{фиол}}$

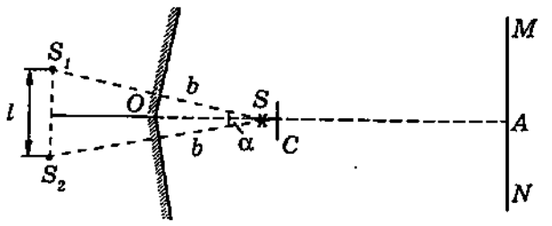
$\lambda_{\text{кр}} \sim d$, *огибает преграду, практически не «замечая» ее, отражение слабое, следовательно почти не рассеивается.*

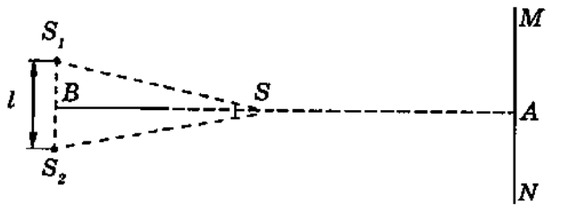
$\lambda_{\text{фиол}} < d$, *отражение — главная причина изменения направления.*

Расчетные задачи

Дано:
2 плоские зеркала,
α
$AO = a$
λ
Δx — ?







Решение.

1. Найдем расстояние L от экрана до мнимых источников S_1 и S_2:
$$L \approx a + b.$$
2. Найдем расстояние между источниками S_1 и S_2:
$$\frac{l}{2} = 2b \cdot \sin\frac{\alpha}{2}; \quad l = 4b \cdot \sin\frac{\alpha}{2}.$$
3. Воспользуемся результатом задачи 4 из §7
$$x_{k,\max} = \frac{k\lambda L}{l},$$
тогда расстояние между соседними максимумами составит:
$$\Delta x_{\max} = x_{k+1,\max} - x_{k,\max} = \frac{(k+1)\lambda L}{l} - \frac{k\lambda L}{l} = \frac{\lambda L}{l}.$$
4. Окончательно получим:
$$\Delta x_{\max} = \frac{\lambda(a+b)}{4b \cdot \sin\frac{\alpha}{2}} \approx \frac{\lambda(a+b)}{2b\alpha},$$
так как при малых углах $\sin\frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$.

Задача 4. Два плоских зеркала образуют между собой малый угол α (бизеркала Френеля). На равных расстояниях от зеркал расположен источник света S. Определить расстояния между соседними интерференционными полосами на экране MN, расположенном на расстоянии $AO = a$ от линии пересечения зеркал. Длина волны λ. Ширма C препятствует непосредственному попаданию света на экран.

Сначала определим, как образуются когерентные волны, дающие на экране интерференционную картину, и выполним необходимые построения.

Световые лучи падают на поверхность каждого зеркала и дают после отражения два световых пучка .

Продолжения отраженных от зеркала лучей пересекаются в точках S_1 и S_2, которые являются мнимыми изображениями источника в каждом из зеркал.

Отраженные световые пучки накладываются друг на друга и дают интерференционную картину на экране, так как отраженные волны когерентны: они являются частями одной волны, имеют одинаковую частоту и амплитуду и постоянный во времени сдвиг фаз.

Положение мнимых источников света по отношению к экрану можно найти, исходя из того, что изображение в плоском зеркале расположено симметрично источнику относительно плоскости зеркала. Следовательно, расстояние от каждого мнимого источника до зеркала равно b.

Так как угол α очень мал, то расстояние между источниками S_1 и S_2 также мало. Поэтому можно считать, что расстояние от линии, соединяющей мнимые источники, до линии пересечения зеркал в точке O примерно равно b.

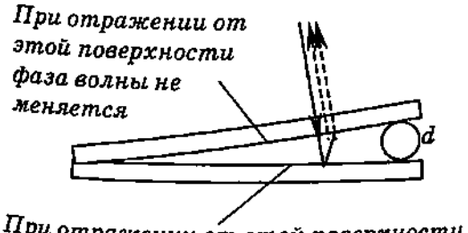
Тогда расстояние от линии, на которой лежат источники S_1 и S_2, до экрана примерно равно $a + b$.

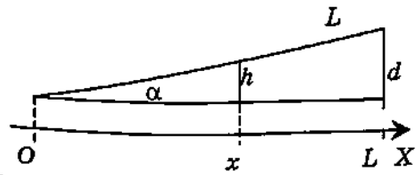
Половину растояния между источниками можно найти из прямоугольного треугольника BSS_1. В нем гипотенуза равна $2b$, а угол, лежащий против искомого катета, равен $\alpha/2$.

Теперь задача сводится к расчету интерференционной картины от двух когерентных источников S_1 и S_2 известной длины волны, находящихся на известном расстоянии l друг от друга и от экрана (см. §7, задача 4).

Дано: | *СИ:*
$d = 0,085$ мм | $8,5 \cdot 10^{-5}$м
$L = 25$ см | 0,25 м
$\lambda = 700$ нм | $7 \cdot 10^{-7}$м
$\frac{N}{L}$ – ?

Решение:





1. Допустим, что в точке x наблюдается максимум интерференции k – го порядка, тогда:
$$2h + \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \ldots$$
2. Из подобия треугольников: $\frac{h}{d} = \frac{x}{L}$; $h = \frac{dx}{L}$.
3. Тогда:
$$\frac{2dx}{L} = k\lambda - \frac{\lambda}{2}; \qquad x = \frac{(2k-1)\lambda L}{4d}.$$
4. Найдем расстояние между соседними максимумами интерференции:
$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{(2k+2-1)\lambda L}{4d} - \frac{(2k-1)\lambda L}{4d} = \frac{\lambda L}{2d},$$
то есть расстояние между соседними полосами не зависит от их расположения по отношению к месту соприкосновения полосок стекла. Следовательно, интерференционные полосы расположены на одинаковых расстояниях вдоль всей длины пластинки.
5. Полное число полос $N = \frac{L}{\Delta x}$, а число полос на единице длины: $\frac{N}{L} = \frac{1}{\Delta x} = \frac{2d}{\lambda L}$
6. Проведем вычисления:
$$\frac{N}{L} = \frac{2 \cdot 8,5 \cdot 10^{-5}\text{ м}}{7 \cdot 10^{-7}\text{ м} \cdot 0,25\text{ м}} \approx 10 \cdot 10^2 \frac{1}{\text{м}} = 10 \frac{1}{\text{см}}$$

Задача 5. Между двумя стеклянными пластинками зажата металлическая проволочка диаметром 0,085 мм. Расстояние от проволочки до линии соприкосновения пластинок равно 25 см. При освещении пластинок монохроматическим светом с длиной волны 700 нм видны интерференционные полосы, расположенные параллельно линии соприкосновения пластинок. Определить число полос на одном сантиметре длины.

В этой задаче рассматривается ситуация, которая лежит в основе проверки качества стеклянных (в данном случае плоских) поверхностей. Между проверяемой поверхностью и эталонной создают воздушный зазор, помещая между ними тонкую проволоку или волос. Если поверхность содержит отклонения от плоскости, то интерференционные полосы искривляются. По степени искривления можно судить о степени неровности поверхности.

При решении задачи будем исходить из того, что пластинки идеально плоские. Изобразим сечение клина и покажем на рисунке основные линейные размеры установки.

Так как толщина проволоки очень мала по сравнению с расстоянием от нее до линии соприкосновения пластинок, то угол, образованный пластинками столь мал, что можно считать треугольник ABC прямоугольным.

Как и при рассмотрении колец Ньютона интерферируют волны 2 и 3, отраженные от верхней и нижней поверхностей воздушного клина. Разность хода этих волн зависит от высоты воздушного зазора в данном месте, а он, в свою очередь, зависит от расстояния до места соприкосновения пластинок.

При отражении от верхней поверхности воздушного зазора изменения фазы волны не происходит (отражение происходит от оптически менее плотной среды). А при отражении на нижней границе фаза отраженной волны меняется на π.

Найдем положения соседних интерференционных максимумов в зависимости от расстояния, отсчитанного от места соприкосновения полос, и расстояние между ними.

Теперь нетрудно найти число полос на единице длины клина, рассчитывая величину, обратную этому расстоянию.

Дано: *СИ:*

дифракционная решетка

$d = 0{,}01$ мм $1 \cdot 10^{-5}$ м

белый свет

$\lambda_ф = 0{,}38$ мкм $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ м

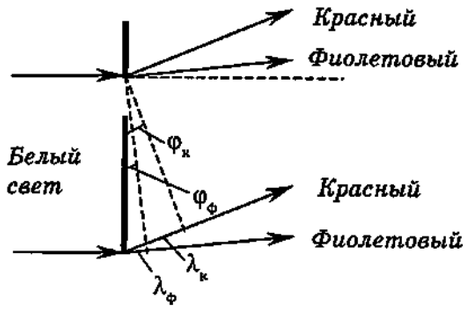
$\lambda_к = 0{,}76$ мкм $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ м

$L = 3$ м

Δx — ?

Решение:

1. Сделаем пояснительный рисунок.

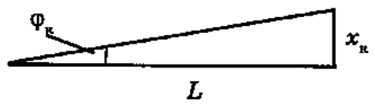


2. Запишем условие максимума первого порядка для лучей красного и фиолетового света:

$$d \sin \varphi_к = \lambda_к$$

$$d \sin \varphi_ф = \lambda_ф$$

3. Сделаем геометрическое построение:



4. Так как $L >> x_к$, то

$$\sin\varphi_к \approx \operatorname{tg}\varphi_к = \frac{x_к}{L}; \qquad x_к = L\sin\varphi_к.$$

$$\sin\varphi_ф \approx \operatorname{tg}\varphi_ф = \frac{x_ф}{L}; \qquad x_ф = L\sin\varphi_ф.$$

5. Подставим значение синуса угла из условия для максимума интерференции:

$$x_к = L \cdot \frac{\lambda_к}{d};$$

$$x_ф = L \cdot \frac{\lambda_ф}{d};$$

$$\Delta x_{1\text{-го порядка}} = \frac{L(\lambda_к - \lambda_ф)}{d}$$

6. Проведем вычисления:

$$\Delta x_{1\text{-го порядка}} = \frac{3\text{ м} \cdot (7{,}6 - 3{,}8) \cdot 10^{-7}\text{ м}}{10^{-5}\text{ м}} =$$

$$= 11{,}4 \cdot 10^{-2}\text{ м} = 11{,}4\text{ см}$$

7. Для спектра второго порядка

$$\Delta x_{1\text{-го порядка}} = \frac{2L(\lambda_к - \lambda_ф)}{d} \approx 23\text{ см}$$

Задача 6. Какова ширина всего спектра первого порядка (длины волн заключены в пределах от 0,38 мкм до 0,76 мкм), полученного на экране при помощи дифракционной решетки с периодом 0,01 мм, если расстояние от решетки до экрана составляет 3 м? Будет ли ширина спектра второго порядка такой же?

Как обычно, выполним построение хода волн, длина которых лежит в указанном диапазоне и испытавших дифракцию на дифракционной решетке.

Покажем на рисунке углы дифракции для максимумов первого порядка.

На том же рисунке покажем разность хода двух соседних монохроматических волн. Заметим, что для максимума первого порядка эта разность хода составляет одну длину волны соответствующего цвета.

Обратим внимание: так как длина волны красного света больше длины волны фиолетового, то и угол дифракции для волн красного света больше, чем у фиолетового. То есть лучи красного света отклонятся дифракционной решеткой сильнее (на больший угол). Следовательно, на экране максимум интерференции для красных лучей будет дальше отстоять от центрального (белого) максимума.

Запишем условия максимумов интерференции первого порядка ($k = 1$) для длин волн, лежащих в указанных пределах.

Выполним геометрическое построение, покажем на нем расстояние от дифракционной решетки до экрана и местоположение максимума интерференции первого порядка для красных (фиолетовых) лучей.

Воспользуемся тем, что расстояние от дифракционной решетки до экрана велико, а углы дифракции очень малы. Тогда можно заменить синус угла на тангенс того же угла. А последний выразить из прямоугольного треугольника, катеты которого известны или отыскиваются в задаче.

Подсчитаем, на каком расстоянии от центрального максимума наблюдается максимум первого порядка для красных и фиолетовых волн. Теперь можно найти ширину спектра первого порядка.

Для спектра второго порядка нужно повторить все выкладки, заменяя разность хода двух соседних волн на 2λ. Поэтому ширина спектра второго порядка будет примерно в 2 раза больше, чем у спектра первого порядка.

§ 18. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Основные понятия геометрической оптики

1. Точечный источник света

2. Луч

3. Угол падения луча

4. Угол отражения луча

5. Угол преломления луча

6. Показатель преломления одной среды относительно другой

Основные явления, изучаемые в геометрической оптике

1. Прямолинейное распространение света

2. Диффузное и зеркальное отражение света

3. Преломление света

4. Полное (внутреннее) отражение света

Границы применимости геометрической оптики

1. Размеры преград (тел, объектов, с которыми взаимодействует свет) значительно больше длины световой волны: $d >> \lambda$.

2. Результаты взаимодействия света с телами рассматриваются в непосредственной близости от тел.

Роль и свойства глаза в наблюдениях

1. Оптическая система глаза собирает расходящийся пучок лучей в точку на сетчатке.

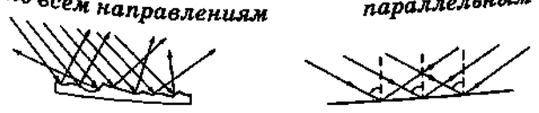
2. Мозг обрабатывает зрительное ощущение, собирая расходящиеся лучи или их продолжения в точку, из которой они исходят или кажутся исходящими (реальные или мнимые изображения)

Отражение света

Диффузное *Зеркальное*

пучок параллельных лучей света

рассеивается по всем направлениям *остается параллельным*



Явления отражения и преломления света вы уже изучали дважды. Один раз — в основной школе, в рамках геометрической оптики; другой раз — когда в этом учебном году изучали явления, происходящие при распространении волн.

В рамках геометрической оптики, как вы помните, мы исходили из представлений о световых лучах, которые, выходя из источника света, распространяются прямолинейно до тех пор, пока не встретят на своем пути преграду (иначе: границу раздела двух сред).

При этом размеры преград для нас не были существенны. Например, при построении геометрической тени объектов разных размеров мы действовали совершенно одинаково: проводили лучи через крайние точки и показывали область пространства, куда световые лучи не попадают.

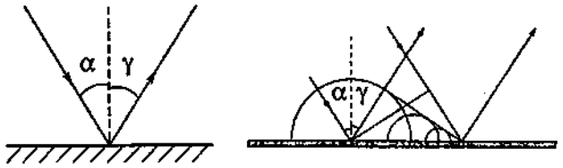
Описывая явления отражения и преломления света с количественной точки зрения, мы установили законы отражения и преломления света на основе эмпирических фактов, вытекающих из анализа огромного числа опытов. Эти законы связывали между собой углы падения, отражения и преломления.

При помощи этих законов мы смогли описать ход лучей в разных оптических системах, сконструировать устройства (например, фотоаппарат, проекционный аппарат, микроскоп, телескоп, лупу, очки), которые получили применение в обширных областях жизнедеятельности человека.

Те же самые явления мы обнаружили во второй раз при изучении волновых процессов и описали их количественно, исходя из представлений о свете как о волне и из принципа Гюйгенса. В этом случае мы вывели законы отражения и преломления волн (света) теоретическим путем.

И если в рамках геометрической оптики мы совсем не прибегали к такой важной характеристике света, как его скорость, то в волновой оптике мы показали, что явление преломления света происходит именно из-за того, что скорость света меняется при переходе из одной среды в другую.

Точно также закон отражения света вытекает из того факта, что в данной среде скорость света постоянна и не зависит от направления его распространения.



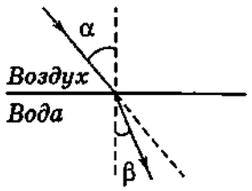
Закон отражения света

1. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восставленный из точки падения луча лежат в одной плоскости.

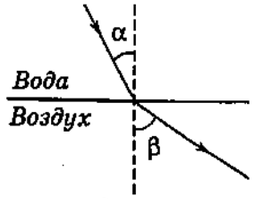
2. Угол отражения равен углу падения: $\gamma = \alpha$.

3. Отраженный и падающий лучи взаимно обратимы.

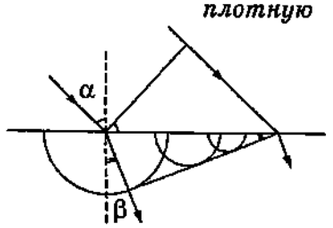
Преломление света



$\beta < \alpha$,
лучи идут из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную



$\beta > \alpha$,
лучи идут из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную



Закон преломления света

1. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восставленный из точки падения луча лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данной пары сред и не зависит от угла падения или угла преломления:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{2,1}; \qquad n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

3. Отраженный и преломленный лучи взаимно обратимы.

Справка

1. Показатель преломления какой-либо среды относительно вакуума (воздуха) называется абсолютным показателем преломления данной среды: $n = c/v$.

2. Относительный показатель преломления:

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c}{c}\cdot\frac{v_1}{v_2} = \frac{c}{v_2}\cdot\frac{v_1}{c} = \frac{n_2}{n_1}$$

Как видно даже из этого простого описания, выводы, полученные на основании разных подходов, полностью совпали. Теоретический подход, как этого и следовало ожидать, объяснил все факты, установленные в рамках эмпирического подхода. И если теперь воспользоваться знаниями об интерференции и дифракции света, то можно определить область (или границы) применимости геометрической оптики: законы геометрической оптики строго выполняются, когда явления дифракции и интерференции можно не учитывать, как мало существенные. Это можно сделать во всех случаях, когда размеры объектов значительно больше длины световой волны, и когда эффекты взаимодействия света с телами рассматриваются в непосредственной близости от этих тел.

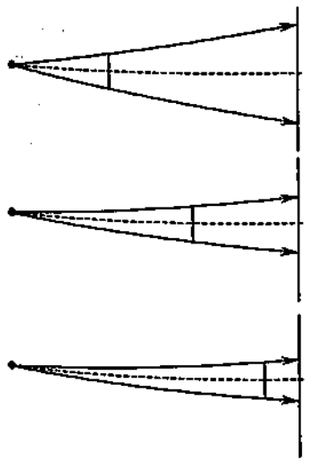
В левом столбце этого параграфа мы привели для справки перечень основных понятий, физических моделей и величин, формулировки и математическую запись законов, типичные построения хода лучей. Во всех случаях мы будем пользоваться стандартными обозначениями величин, а при выполнении построений — стандартными процедурами.

Нам хотелось бы, чтобы вы вспомнили, что всегда в процессе наблюдения очень важную роль играет глаз человека — оптическая система, позволяющая формировать на сетчатке действительные изображения наблюдаемых объектов и явлений. В глаз человека свет одновременно поступает от многих объектов (или многих точек одного объекта). Чаще всего, свет идет по разным направлениям, образуя расходящийся пучок лучей.

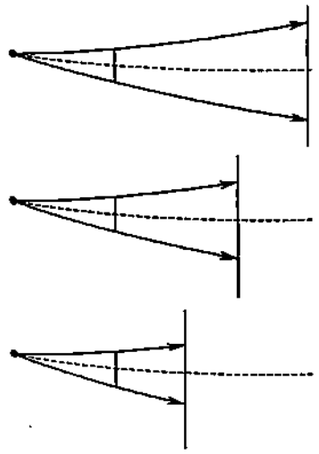
Напомним, что зрительное (сенсорное) ощущение, в дальнейшем, обрабатывается человеческим мозгом.

Эта обработка, в частности, состоит в том, что расходящийся пучок лучей или их продолжений собирается в точку, из которой лучи вышли или «кажется, что они из нее вышли». То есть мнимое изображение воспринимается глазом «как существующее реально». Оно обладает вполне определенными свойствами .

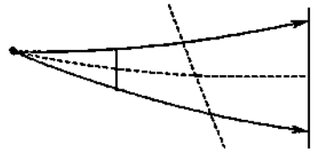
Будем исходить из того, что подробное повторение изученного ранее излишне, и дальнейшее изучение геометрической оптики мы построим как обсуждение некоторых важных ситуаций, которые затем будем использовать при решении конкретных задач.



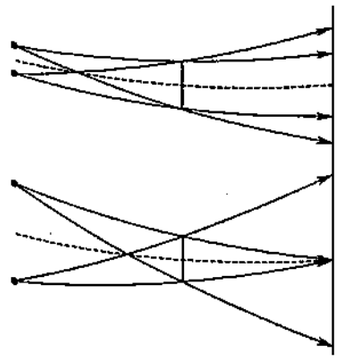
Расстояние между точечным источником света и экраном не меняется. Размеры тени тела уменьшаются при приближении тела к экрану.



Расстояние между точечным источником света и телом не меняются. Размеры тени уменьшаются при приближении экрана к телу.



Форма тени зависит от положения экрана



Если тело освещается двумя точечными источниками света или протяженным источником, то на экране образуются тень и полутень.

Начнем с явления прямолинейного распространения света.

Ситуация 1. Образование тени и полутени предмета на экране. Соотношение размеров тела и размеров тени. Форма тени. Угловые размеры тел.

Образование геометрической тени связано с прямолинейным распространением света и явлениями отражения и поглощения света непрозрачным телом.

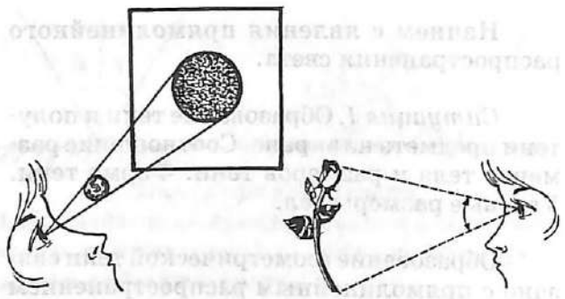
Для построения тени тела от точечного источника света проводят световые лучи через концевые (крайние) точки тела. В этом случае за телом выделяется область пространства, в которую световые лучи от данного источника не поступают. Это — область тени. Обнаружить ее можно двумя способами. Если «расположить» глаз человека в области тени, то источник света и сам предмет (если он несамосветящийся) не видны: в глаз не поступает световая энергия.

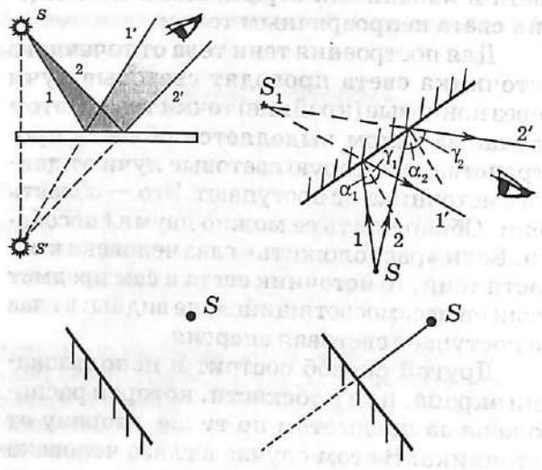
Другой способ состоит в использовании экрана, или плоскости, которая расположена за предметом по ту же сторону от источника. В этом случае в глаза человека должны поступать световые лучи, отраженные от экрана. Поскольку в область тени свет не поступает, то и отражаться «не чему», поэтому на экране (в общем случае) можно выделить две области: ту, в которую свет от источника попадает; и ту, в которую свет не попадает. Тогда на освещенном экране мы наблюдаем тень предмета.

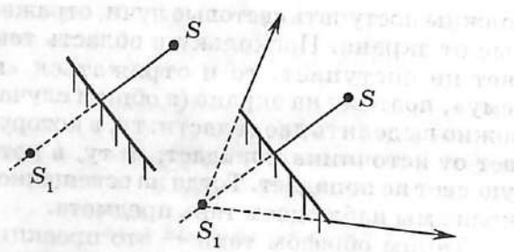
Таким образом тень — это проекция или сечение области тени плоскостью. В таком случае понятно, что форма и размеры тени зависят от расстояния от источника до предмета, от расстояния от предмета до экрана; от угла, который образует нормаль к поверхности экрана с линией, соединяющей источник с предметом, от того, как ориентирован сам предмет по отношению к источнику света и экрану.

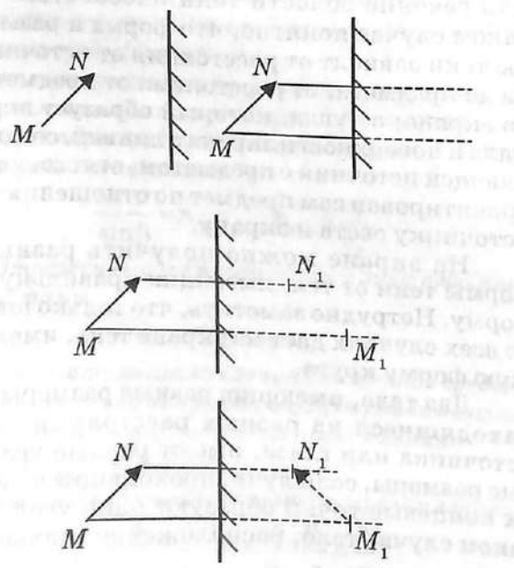
На экране можно получить разные формы тени от тел, имеющих правильную форму. Нетрудно заметить, что только шар во всех случаях дает на экране тень, имеющую форму круга.

Два тела, имеющие разные размеры и находящиеся на разных расстояниях от источника или глаза, имеют равные угловые размеры, если лучи, проходящие через их концевые точки образуют один угол. В таком случае тело, расположенное дальше









от источника, может целиком поместиться в тени первого тела. Типичным примером естественных тел, имеющих примерно равные угловые размеры для человека на Земле, являются Луна и Солнце. Поэтому мы имеем возможность наблюдать полные солнечные затмения.

Ситуация 2. Отражение света от плоского зеркала. Свойства изображения.

Напомним, что изображение предмета в зеркале формируется на сетчатке глаза, когда в него попадают отраженные от зеркала лучи, исходящие от рассматриваемого в зеркале предмета. Поэтому при построении изображения в зеркале всегда нужно иметь в виду, что в данной ситуации участвуют три объекта: источник света (самосветящееся тело или тело, светящее отраженным светом), зеркало и глаза человека.

Для построения изображения любой точки тела в зеркале нужно знать ход двух любых лучей, исходящих из нее и отраженных зеркалом. При построении хода луча пользуемся законом отражения. При выборе лучей нужно пользоваться соображениями удобства. Удобно выбирать луч, угол падения которого на зеркало равен нулю. Такой луч отражается зеркалом в обратном направлении.

Построение точечного источника света в плоском зеркале позволяет установить, что изображение расположено симметрично источнику по отношению к зеркалу.

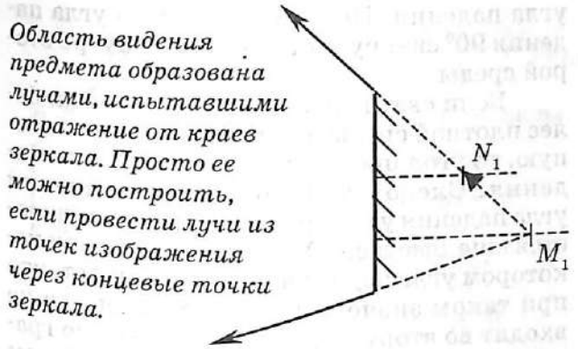
Поэтому для удобства построения изображения протяженного тела в зеркале можно воспользоваться таким алгоритмом:

— выбрать крайние точки тела;

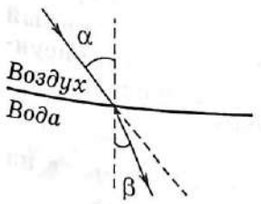
— построить симметричные им точки относительно плоскости зеркала. Для этого нужно опустить перпендикуляры из этих точек на зеркало, продолжить их пунктиром за плоскость зеркала и отложить на продолжении перпендикуляра расстояние, равное расстоянию от точки до зеркала;

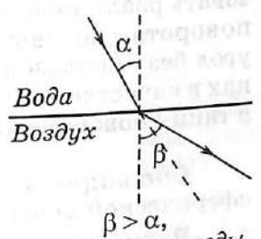
— соединить полученные точки между собой **пунктиром**, так как в данные точки пространства световая энергия не поступает.

Точно также можно построить всю область пространства, в которой распространяются лучи, отраженные от зеркала конечных размеров. Это — область видения объекта в данном зеркале. Область видения ограничена лучами, проходящими через



Область видения предмета образована лучами, испытавшими отражение от краев зеркала. Просто ее можно построить, если провести лучи из точек изображения через концевые точки зеркала.





$\beta < \alpha$,
лучи идут из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную

$\beta > \alpha$,
лучи идут из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную

$$\upsilon_1 > \upsilon_2$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = n_{2,1} > 1;$$

$$\sin\alpha = n_{2,1} \cdot \sin\beta;$$

$$\alpha > \beta;$$

$$\upsilon_1 < \upsilon_2$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = n_{2,1} < 1;$$

$$\sin\alpha = n_{2,1} \cdot \sin\beta;$$

$$\alpha < \beta;$$

Расчет предельного угла полного отражения света

1-ая среда υ_1, 2-ая среда υ_2,

$$\upsilon_1 < \upsilon_2:$$

$$\frac{\sin\alpha_0}{\sin\beta_0} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = n_{2,1} < 1;$$

$$\beta_0 = 90°; \quad \sin\beta_0 = 1;$$

$$\sin\alpha_0 = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = n_{2,1} < 1.$$

края зеркала и выходящими из изображения источника в зеркале.

Перечислим свойства изображения, получаемого в плоском зеркале:

— изображение мнимое, так как световая энергия в точки «за зеркалом» не поступает; точки изображения образованы продолжениями лучей за зеркалом, а не самими лучами;

— изображение имеет те же размеры, что и сам предмет;

— изображение расположено симметрично предмету относительно плоскости зеркала.

Другие свойства изображения (прямое или перевернутое, замена «правого» на «левое», и пр.) должны определяться в каждом конкретном случае отдельно. При этом следует исходить из того, что плоскость зеркала меняет на противоположное направление оси, перпендикулярной к плоскости зеркала.

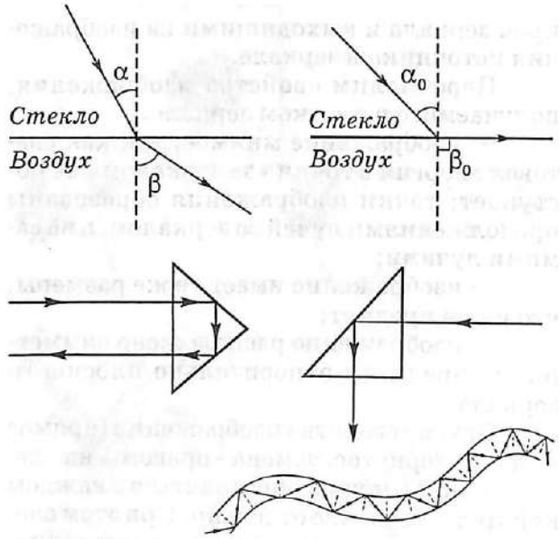
Ситуация 3. Преломление света происходит на плоской границе раздела двух сред. Условия наблюдения полного отражения света.

При прохождении лучами света границы раздела двух прозрачных сред происходит преломление — луч света отклоняется от первоначального направления распространения. При этом он может приближаться к перпендикуляру, когда идет среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную. В другом случае, при переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, луч отклоняется в сторону от перпендикуляра, восставленного в точке падения луча.

О том, какая из двух сред оптически более плотная, можно судить по значению скорости света в данной среде. Та из двух сред, в которой скорость света больше, является оптически менее плотной.

Явление полного отражения света можно объяснить, если воспользоваться закономерностью, которая наблюдается при преломлении света. Она состоит в том, что при увеличении угла падения угол преломления тоже увеличивается.

Будем увеличивать угол падения от 0° до 90°. Тогда при переходе луча из оптически менее плотной среды в оптически более плотную угол преломления будетто же увеличиваться, оставаясь при этом меньше



Название сред	Предельный угол полного отражения
вода — воздух	48,5°
стекло — воздух	42°
стекло — вода	63°

угла падения. Поэтому вплоть до угла падения 90° свет будет проникать внутрь второй среды.

Если свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения. Следовательно, при увеличении угла падения угол преломления увеличивается еще быстрее. Он достигнет 90° при некотором угле падения α_0. Это означает, что при таком значении угла падения луч не входит во вторую среду, а скользит по границе раздела двух сред. При дальнейшем увеличении угла падения свет испытывает на этой границе только отражение. Говорят о **полном отражении света**.

Для каждой пары сред можно найти предельный угол полного отражения, то есть угол падения, при котором угол преломления равен 90°. В таблице приведены значения предельных углов для некоторых пар сред.

Знание этих углов позволяет использовать различные стеклянные призмы для поворота световых пучков на заданный угол без использования зеркал. На рисунках в качестве примера приведен ход лучей в таких поворотных призмах.

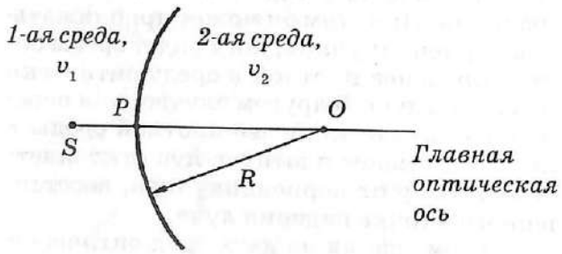
Ситуация 4. Преломление света на сферической поверхности.

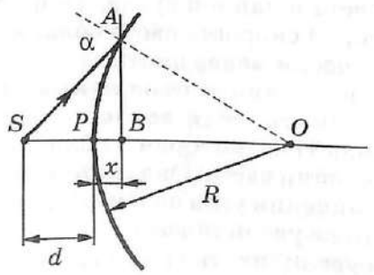
Важное практическое применение в оптике нашли линзы — прозрачные тела, ограниченные сферическими поверхностями. В таком случае, нужно установить закономерности преломления света на сферической поверхности.

Изобразим сферическую поверхность радиуса R с центром в точке O. Назовем линию, проходящую (в плоскости листа) через центр сферической поверхности и делящую ее на две симметричные части, главной оптической осью. Луч, идущий вдоль этой оси, проходит во вторую среду не преломляясь, так как угол его падения на границу раздела равен 0°.

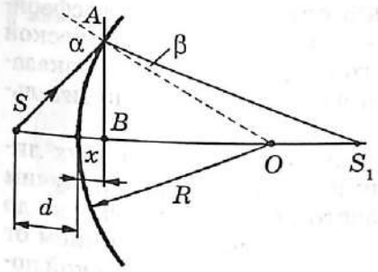
Будем рассматривать только лучи, идущие вблизи главной оптической оси (они называются **параксиальными**). Тогда углы падения их на сферическую поверхность очень малы и при расчетах можно заменять синус и тангенс соответствующих углов на значение угла, выраженного в радианах.

Построим ход луча SA, падающего на сферическую поверхность из точечного источника S. Угол падения этого луча образован этим лучом и перпендикуляром, восставленным из точки его падения. Чтобы построить перпендикуляр в эту точку, нужно провести радиус окружности в данную точку. Обозначим угол падения луча α.





d — расстояние от источника S до сферической поверхности



$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_1}{v_2}=n_{2,1};$$

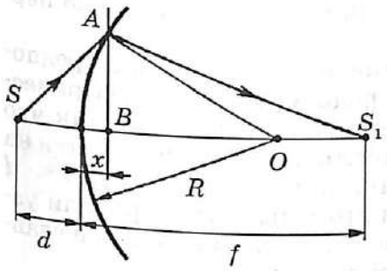
α, β – малы,

$\sin\alpha \approx \alpha$;

$\sin\beta \approx \beta$;

$$\frac{\alpha}{\beta}=n_{2,1};$$

$$\alpha = n_{2,1}\beta.$$



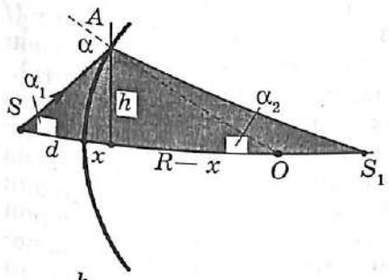
f — расстояние от изображения источника до сферической поверхности

Будем считать, что свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, то есть $v_1 > v_2$. Тогда угол преломления меньше угла падения, и после преломления луч света отклоняется в сторону главной оптической оси.

Продолжим ход этого луча до пересечения с главной оптической осью. В этой точке пересекаются два луча, выходящие из источника света. Ход первого луча мы уже описали, а второй луч — луч, идущий вдоль главной оптической оси. Он, как уже говорилось выше, входит во вторую среду без преломления, так как его угол падения на границу раздела двух сред равен нулю.

Обозначим расстояние от источника S до сферической поверхности буквой d, расстояние от изображения источника S_1 буквой f и сделаем дополнительные построения (они показаны на рисунке).

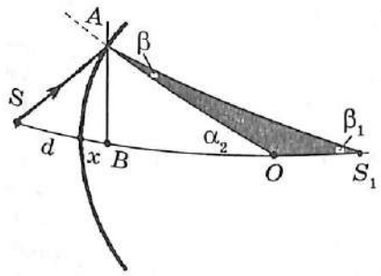
Обозначим h высоту треугольника ASO, а углы при его основании соответственно α_1 и α_2. Угол α является внешним углом этого треугольника, и следовательно, равен сумме углов, не смежных с ним.



α — внешний угол ΔASO, поэтому $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$;

$$\frac{h}{d+x}=\operatorname{tg}\alpha_1 \approx \alpha_1; \qquad \frac{h}{R-x}=\operatorname{tg}\alpha_2 \approx \alpha_2;$$

Тогда: $$\frac{h}{d+x}+\frac{h}{R-x}=\alpha.$$



α_2 — внешний угол ΔAOS_1, поэтому $\alpha_2 = \beta + \beta_1$, $\beta = \alpha_2 - \beta_1$.

$$\frac{h}{f-x}=\operatorname{tg}\beta_1 \approx \beta_1; \qquad \frac{h}{R-x}=\operatorname{tg}\alpha_2 \approx \alpha_2;$$

Тогда: $$\frac{h}{R-x}-\frac{h}{f-x}=\beta=\frac{\alpha}{n_{2,1}}.$$

Выразим тангенсы этих углов через катеты прямоугольных треугольников с высотой h. Так как все углы очень малы (мы рассматриваем параксилальные лучи), то тангенс угла примерно равен самому углу. Выражая сумму углов через h, d, x и R, получим связь между углом α и перечисленными линейными величинами.

Теперь рассмотрим треугольник AOS_1. Для него внешним углом является угол α_2. Значит, он равен сумме углов треугольника AOS_1, не смежных с ним.

Снова выразим тангенсы острых углов прямоугольных треугольников ABO и ABS_1 через катеты этих треугольников. Заметим, что один из катетов равен h, а другие равны соответственно $(R - x)$ и $(f - x)$.

Как и раньше заменим тангенсы углов на значения углов, так как углы очень малы, и найдем выражение для угла β, подставляя вместо α_2 и β_1 их выражения через катеты треугольников.

Таким образом, мы получили два уравнения, связывающие между собой расстояние от источника до сферической поверх-

$$\begin{cases} \dfrac{h}{d+x}+\dfrac{h}{R-x}=\alpha; \\ \dfrac{h}{R-x}-\dfrac{h}{f-x}=\dfrac{\alpha}{n_{2,1}}; \end{cases}$$

Разделим первое уравнение на $n_{2,1}$:

$$\frac{h}{n_{2,1}(d+x)}+\frac{h}{n_{2,1}(R-x)}=\frac{\alpha}{n_{2,1}};$$

сравнивая оба уравнения, получим:

$$\frac{h}{n_{2,1}(d+x)}+\frac{h}{n_{2,1}(R-x)}=\frac{h}{R-x}-\frac{h}{f-x}$$

так как $x \ll d$, $x \ll f$, $x \ll R$, *получим:*

$$\frac{1}{n_{2,1}d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{R}-\frac{1}{n_{2,1}R};$$

умножим обе части равенства на $n_{2,1}$:

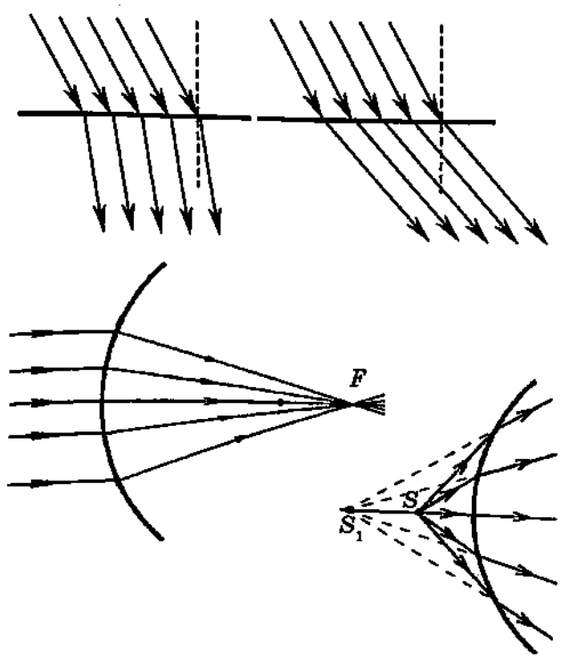
$$\frac{1}{d}+\frac{n_{2,1}}{f}=\frac{n_{2,1}-1}{R}.$$

Если $d \to \infty$, *то* $\dfrac{1}{d} \to 0$ *и* $\dfrac{n_{2,1}}{f}=\dfrac{n_{2,1}-1}{R}$;

$$f \equiv F=\frac{n_{2,1}R}{n_{2,1}-1}.$$

Если $d<\dfrac{R}{n_{2,1}-1}$, *то* $\dfrac{n_{2,1}}{f}=\dfrac{n_{2,1}-1}{R}-\dfrac{1}{d}<0$;

$f<0$.



ности, расстояние от изображения до сферической поверхности, радиус сферической поверхности, угол падения луча и показатель преломления второй среды относительно первой.

Теперь составим систему из двух линейных уравнений, решая которую получим связь между расстоянием от источника до сферической поверхности, расстоянием от изображения источника до сферической поверхности, ее радиусом и показателем преломления второй среды относительно первой.

Выражение получено нами в предположении, что радиус кривизны сферической поверхности очень большой, так что $x << R$, а также что источник находится на большом расстоянии от поверхности $x << d$ и $x << f$. При этом мы рассматривали узкий пучок лучей, проходящих вблизи главной оптической оси поверхности.

Проанализируем полученное выражение. Во-первых, из данного выражения следует, что сферическая поверхность собирает падающий на нее узкий пучок лучей, исходящий из источника, в одну точку (f для всех таких лучей одно и то же, не зависит от угла падения луча на поверхность).

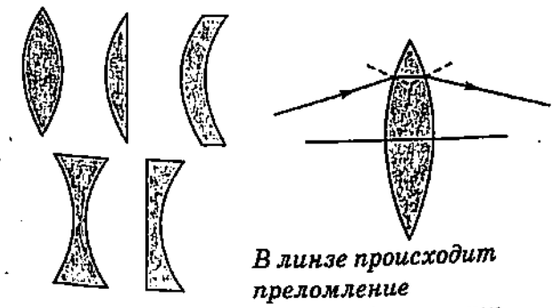
Во-вторых, если на такую поверхность падает параллельный пучок лучей (это означает, что источник света находится на очень большом расстоянии, $d \to \infty$), то они собираются в точке, положение которой зависит только от радиуса сферической поверхности и относительного показателя преломления этой среды. Эта точка называется фокусом сферической поверхности.

Таким образом, сферическая поверхность не сохраняет параллельности падающего на нее пучка (в отличие от плоской), делая его сначала сходящимся, а затем расходящимся.

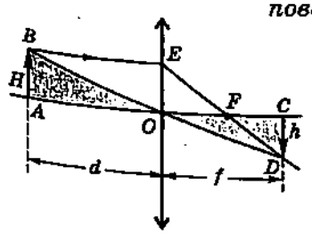
В-третьих, пройдя через эту точку, световой пучок расходится, распространяясь в этой среде как от «самостоятельного» действительного точечного источника света.

В-четвертых, если расстояние от источника света до поверхности оказывается меньше $R/(n_{2,1}-1)$, то изображение источника лежит по другую сторону от сферической поверхности ($f < 0$). Но так как лучи, падающие на сферическую поверхность не могут пересекаться перед этой поверхностью, то пересекаться здесь могут только продолжения лучей, т.е. изображение источника в этом случае — мнимое.

§ 19. ЛИНЗА. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ



В линзе происходит преломление на двух сферических поверхностях



$\Delta ABO \sim \Delta COD$:

$$\frac{h}{H}=\frac{f}{d}.$$

$\Delta EOF \sim \Delta CDF$:

$$\frac{h}{H}=\frac{f-F}{F}.$$

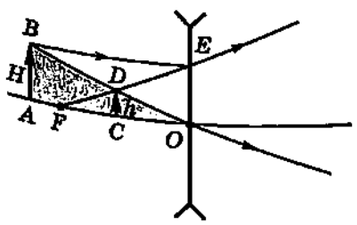
$$\frac{f-F}{F}=\frac{f}{d};$$

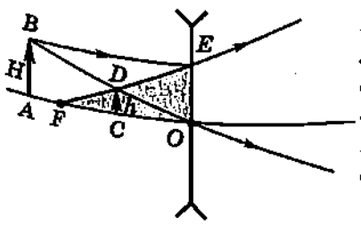
$$\frac{f}{F}-1=\frac{f}{d};$$

$$\frac{f}{F}=1+\frac{f}{d};$$

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f}+\frac{1}{d};$$

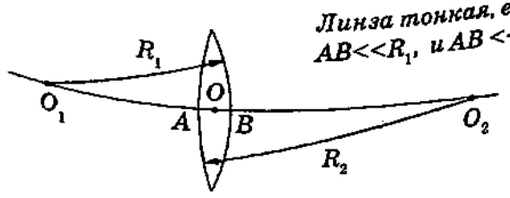
$$D \equiv \frac{1}{F}=\frac{1}{f}+\frac{1}{d}.$$





Если линза рассеивающая, то ее оптическая сила отрицательна, и фокусное расстояние считается отрицательным. Знак «минус» показывает, что фокус мнимый.

Линза тонкая, если $AB << R_1$, *и* $AB << R_2$.



Линзы, как вам известно, являются очень важными оптическими устройствами. Они входят как составные элементы практически во все более сложные оптические приборы и установки, позволяя проводить наблюдения за далекими объектами (телескопы, зрительные трубы, бинокли), фотографировать и воспроизводить изображения слайдов на экранах (фотоаппараты, проекционные аппараты), рассматривать мелкие тела, недоступные невооруженному глазу (лупа, микроскоп), корригировать зрение человека (очки) и многое другое. Поэтому рассмотрим этот оптический прибор более подробно.

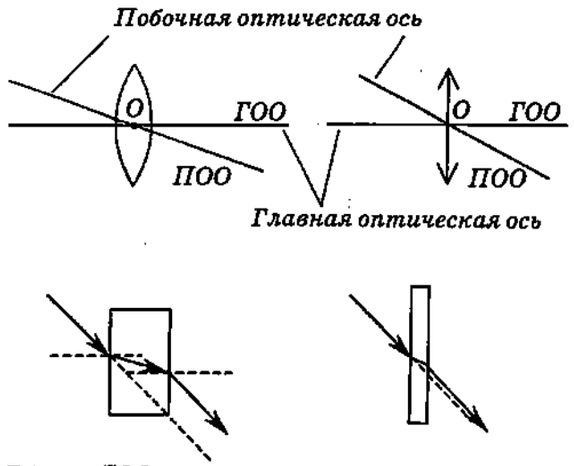
Линза представляет собой прозрачное тело (обычно их изготавливают из стекла), ограниченное двумя сферическими поверхностями: двояковыпуклые, двояковогнутые или выпукло-вогнутые линзы. Одна из поверхностей линзы может быть плоской (можно считать, что в этом случае радиус сферической поверхности неограничен), такие линзы называются плосковыпуклыми или плосковогнутыми.

Принцип действия линзы основан на явлении преломления, которое имеет место на сферической поверхности. Это явление было уже рассмотрено нами, поэтому воспользуемся сделанными выводами и получим формулу тонкой линзы.

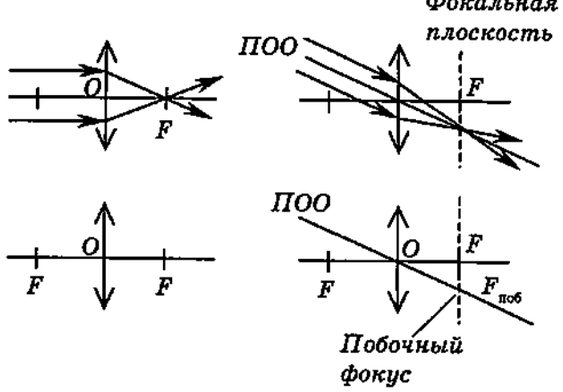
Из курса физики основной школы, вы, возможно, припомните вывод этой формулы, который получен геометрическим путем на основе эмпирического построения хода лучей в линзе. Мы воспроизводим этот вывод с небольшим комментарием в левом столбце параграфа.

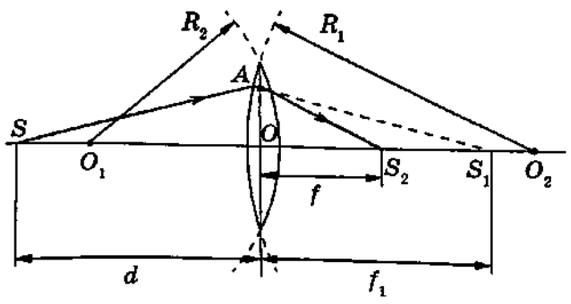
Здесь же обратим внимание на следующее. Во всех дальнейших рассуждениях мы будем пользоваться моделью линзы, так называемой **тонкой линзой**. Она и изображается на чертежах в виде отрезка, ограниченного с двух сторон соответствующими стрелочками. Чтобы понять суть этой модели, обратимся к реальной линзе, ограниченной двумя сферическими поверхностями.

Проведем прямую, соединяющую центры обеих сферических поверхностей — это **главная оптическая ось линзы**. Она пересекает поверхность линзы в точках A и B, являющихся вершинами соответствующих сферических сегментов. Если длина отрез-



Вблизи ГОО линзу можно считать плоскопараллельной пластинкой. Если линза тонкая, то луч, идущий через оптический центр вдоль любой ПОО, бокового смещения практически не испытывает.





d — расстояние от источника до оптического центра линзы;

f — расстояние от оптического центра линзы до изображения источника;

f_1 — расстояние от оптического центра линзы до изображения, формируемого первой сферической поверхностью R_1.

ка AB мала по сравнению с радиусами сферических поверхностей, то можно считать эти точки совпадающими, а линзу — тонкой. Тогда точка пересечения главной оптической оси с тонкой линзой выделяет в ней **оптический центр.**

Эта точка обладает очень важным свойством: лучи, проходящие через оптический центр по любым направлениям не преломляются. Действительно, вблизи вершин сферических сегментов поверхности линзы образуют как бы плоскопаралельную пластинку. Луч света, падающий на такую пластинку под произвольным углом, пройдя ее, выходит параллельно падающему. Вышедший луч испытывает только боковое смещение, которое зависит от толщины пластинки. Так как в нашем случае толщина линзы очень мала, то смещением выходящего луча можно пренебречь.

На главной оптической оси линзы по обе стороны линзы находятся ее **фокусы** — точки, в которых собираются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси. Расстояние от оптического центра линзы до ее фокуса называется **главным фокусным расстоянием линзы.**

Побочной оптической осью линзы называют любую прямую, не совпадающую с главной оптической осью, и проходящую через оптический центр. Если параллельный пучок лучей направить на линзу вдоль побочной оптической оси, то они тоже соберутся в точке, лежащей на этой побочной оси. Эта точка — **побочный фокус.** Поскольку побочных осей можно провести сколько угодно, то и побочных фокусов у линзы сколь угодно много. Они образуют **фокальную плоскость** тонкой линзы. Фокальная плоскость перпендикулярна главной оптической оси и находится на расстоянии, равном главному фокусному от линзы.

Теперь рассмотрим вывод формулы тонкой линзы на основе явления преломления света на сферической поверхности. Как и раньше, будем рассматривать точечный источник света, лежащий на главной оптической оси на расстоянии d от оптического центра линзы. Изображение этого источника находится по другую сторону линзы на расстоянии f от ее оптического центра. Радиусы сферических поверхностей обозначим соответственно R_1 и R_2.

Будем, по-прежнему, рассматривать параксиальные лучи, то есть лучи идущие вблизи главной оптической оси.

Для первой сферической поверхности:

$$\frac{1}{d}+\frac{n_{2,1}}{f_1}=\frac{n_{2,1}-1}{R_1} \qquad (1)$$

Для второй сферической поверхности R_2:

S_1 — источник;

f_1 — расстояние от источника до сферической поверхности;

f — расстояние от поверхности до изображения источника.

Воспользуемся обратимостью световых лучей: если источником является S_2, то изображение его S_1 (причем мнимое!):

$d_1 = f$ — расстояние от источника до сферической поверхности;

f_1 — расстояние от поверхности до изображения источника.

Тогда для второй сферической поверхности:

$$\frac{1}{d_1}-\frac{n_{2,1}}{f_1}=\frac{n_{2,1}-1}{R_2};$$

$$\frac{1}{f}-\frac{n_{2,1}}{f_1}=\frac{n_{2,1}-1}{R_2} \qquad (2)$$

Проведем преобразования. Сложим почленно (1) и (2):

$$\frac{1}{d}+\frac{n_{2,1}}{f_1}+\frac{1}{f}-\frac{n_{2,1}}{f_1}=\frac{n_{2,1}-1}{R_1}+\frac{n_{2,1}-1}{R_2};$$

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{n_{2,1}-1}{R_1}+\frac{n_{2,1}-1}{R_2};$$

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=(n_{2,1}-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right);$$

$$(n_{2,1}-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)\equiv D;$$

$$D=\frac{1}{F};$$

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}.$$

Оптическая сила линзы и главное фокусное расстояние линзы зависят от:

— радиусов сферических поверхностей, ограничивающих линзу;

— относительного показателя преломления материала линзы.

Если одна из поверхностей — плоская, то ее радиус $R\to\infty$, $\frac{1}{R}\to 0$.

Сначала лучи преломляются на сферической поверхности радиуса R_1.

Изображение источника, даваемое этой поверхностью, находится на расстоянии f_1 от оптического центра линзы. Расстояния d, f_1 и R_1, а также относительный показатель преломления стекла в воздухе $n_{2,1}$ связаны между собой полученным ранее соотношением (1).

Лучи, прошедшие в линзу, теперь испытывают преломление на другой сферической поверхности радиуса R_2 и дают изображение в точке, находящейся на расстоянии f от линзы. Как его найти?

На вторую сферическую поверхность световые лучи падают так, как будто они выходят из источника S_1. При этом изображение, которое дает поверхность R_2 лежит по ту же сторону, что и сам источник. То есть для этой поверхности источник S_2 является мнимым изображением. Воспользуемся обратимостью хода лучей в явлении преломления света. Если бы лучи вышли из точки S_2, то ее изображение во второй поверхности получилось бы в точке S_1 и было бы мнимым.

Запишем соотношение (1) для этого случая. Теперь расстояние от источника до линзы равно $d_1 = f_1$. Изображение находится на расстоянии $(-f)$ от линзы (мнимое изображение), а показатель преломления тот же, так как в нашем рассмотрении лучи падают на линзу из воздуха.

Сравним полученные соотношения (1) и (2) между собой. Они имеют одинаковый смысл: связывают между собой расстояния между источником света и соответствующей сферической поверхностью, его изображением и этой поверхностью с радиусом и показателем преломления этой поверхности. Но значения величин, входящих в эти соотношения различны, кроме одного. Это слагаемое — содержащее f_1 — расстояние, на котором формируется «промежуточное» изображение источника.

Складывая почленно первое равенство со вторым, получим уравнение, связывающее интересующие нас расстояния и параметры сферических поверхностей линзы.

Сравните теперь полученную нами формулу тонкой линзы с той, что была получена геометрическим способом. В правой части ее стоит величина, обратная главному фокусному расстоянию. Полученная нами формула позволяет выяснить, от чего оно зависит: от радиусов сферических по-

$D>0$, *если*:

$n_{2,1}-1>0$ и $\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}>0$;

$n_{2,1}>1$

Линза изготовлена из материала оптически более плотного, чем окружающая среда.

Обе поверхности выпуклые.

$D>0$, *если*:

$n_{2,1}-1<0$ и $\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}<0$;

$n_{2,1}<1$

Линза изготовлена из материала оптически менее плотного, чем окружающая среда.

Обе поверхности вогнутые.

$D<0$, *если*:

$n_{2,1}-1<0$ и $\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}>0$;

$n_{2,1}<1$

Линза изготовлена из материала оптически менее плотного, чем окружающая среда.

Обе поверхности выпуклые.

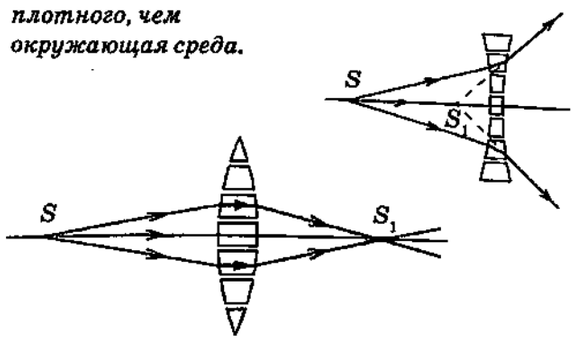
$D<0$, *если*:

$n_{2,1}-1>0$ и $\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}<0$;

$n_{2,1}>1$

Линза изготовлена из материала оптически более плотного, чем окружающая среда.

Обе поверхности вогнутые.



верхностей линзы и показателя преломления стекла, из которого изготовлена линза, в воздухе.

Физический смысл этой точки, конечно, сохраняется: это точка, в которой собираются на главной оптической оси лучи, падающие на линзу параллельно этой оси. Следовательно, и оптическая сила линзы (величина обратная главному фокусному расстоянию) зависит от радиусов сферических поверхностей и относительного показателя преломления материала линзы.

Знак правой части— то есть знак оптической силы линзы — определяет оптические свойства линзы. Если оптическая сила положительная, то линза — собирающая. Такой оказываются двояковыпуклые и плосковыпуклые линзы, изготовленные из материала, для которого $(n_{2,1}-1)>0$ и $\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}>0$.

Это имеет место, когда свет идет из оптически менее плотной среды в оптически более плотную (например, стеклянная линза в воздухе).

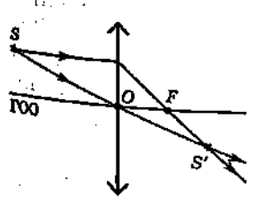
Если линза двояковогнутая или плосковогнутая, то для нее $\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}<0$. Такие линзы, изготовленные из материала с относительным показателем преломления большим единицы являются рассеивающими.

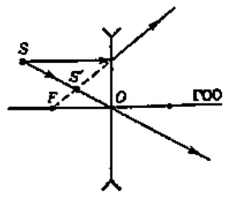
Из формулы можно получить такой интересный факт. Если рассеивающую (в воздухе) линзу поместить в другую среду, так чтобы $(n_{2,1}-1)<0$, то она станет собирающей, хотя и имеет вогнутые поверхности. Точно также, если двояковыпуклую линзу (в воздухе собирающую) поместить в такую среду, где $(n_{2,1}-1)<0$, она станет рассеивающей.

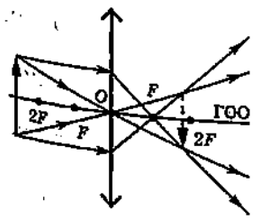
Проведите такие опыты в классе, используя наливные линзы. В воздухе двояковыпуклая линза, заполненная водой, является собирающей. А двояковогнутая, заполненная водой — рассеивающей.

Если вылить воду из линз , плотно закрыть отверстия и пометить их в аквариум с водой, то можно собрать параллельный пучок лучей в точку при помощи двояковогнутой линзы, что возможно только, когда линза собирающая. С помощью двояковогнутой (воздушной) линзы в воде можно в таком случае получить только расходящийся пучок лучей, а это, как вам хорошо известно, признак рассеивающей линзы.

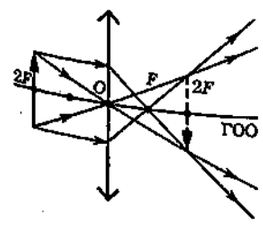
§ 20. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА»



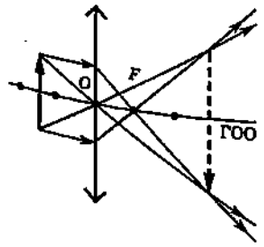




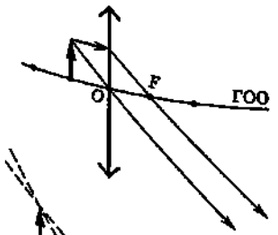
$d>2F$
изображение действительное, перевернутое, уменьшенное, $F<f<2F$



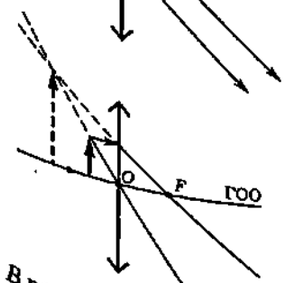
$d=2F$
изображение действительное, перевернутое, равное предмету, $f=2F$



$2F>d>F$
изображение действительное, перевернутое, увеличенное, $f>2F$

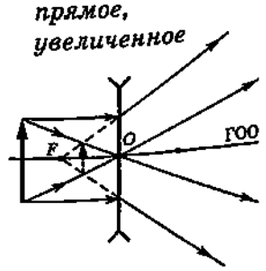


$d=F$
изображение отсутствует, из линзы выходит пучок параллельных лучей (пучок постоянного диаметра)



$d<F$
изображение мнимое, прямое, увеличенное

В рассеивающей линзе всегда получаются мнимые, прямые, уменьшенные изображения



При решении задач по этой теме особенно важно правильно построить чертеж. На нем нужно изобразить ход лучей в ситуации, которая описана в задаче. При этом важно помнить, что «действующими лицами» в задачах по геометрической оптике являются источник света, оптическое устройство (линза, призма, плоскопараллельная пластинка, плоское зеркало и т.п.) и глаз человека.

При построении изображения источника (в большинстве случаев это точечный источник) достаточно знать ход двух лучей, исходящих из него. При этом лучше всего выбирать лучи, ход которых строить проще всего. Одним из таких лучей всегда является луч, падающий на границу раздела двух сред нормально, то есть под углом 0°. Такой луч отражается зеркалом в противоположном направлении, а линзой или призмой не преломляется.

Законы отражения и преломления света лучше всего записывать для каждой границы сначала в общем виде, а затем применительно к данной ситуации. В таком случае вы не допустите ошибок при использовании введенных вами обозначений.

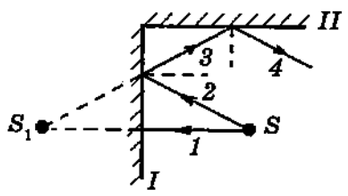
Наконец, при использовании формулы тонкой линзы нужно учитывать «правило знаков». Если известен тип линзы, то знак оптической силы линзы, а, следовательно, фокусного расстояния, отрицательный. Знак «минус» у расстояния f получится автоматически.

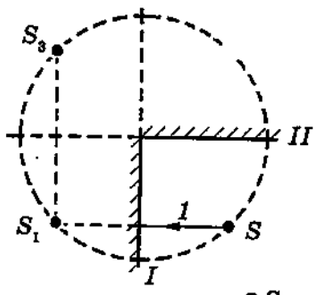
Если тип линзы неизвестен, но известно, что изображение мнимое, то нужно ставить знак «минус» перед расстоянием f. Тогда знак перед F, полученный при расчетах, укажет тип линзы.

Иногда в задачах не указано, что изображение в линзе мнимое, а говорится о том, что оно «прямое». Вспомните, что в линзе прямыми бывают только мнимые изображения предмета.

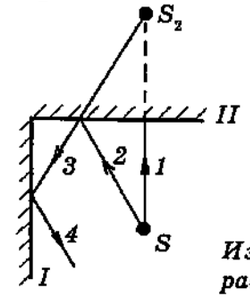
Наконец, при решении задач, в которых проводятся расчеты с учетом оптических свойств глаза человека, нужно помнить, что любые очки формируют «промежуточное» изображение предмета, которое и рассматривает глаз. Это изображение всегда мнимое и должно находиться на расстоянии наилучшего видения, то есть примерно на расстоянии 25 см от оптического центра глаза.

Качественные задачи

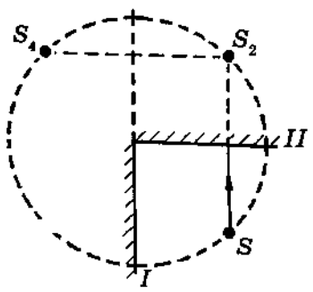


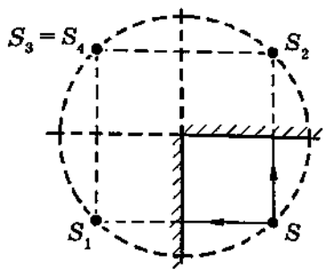


Изображение S_3 расположено симметрично изображению S_1 относительно плоскости зеркала II



Изображение S_4 расположено симметрично изображению S_2 относительно плоскости зеркала I





Изображение S_3 и S_4 накладываются друг на друга. Изображения S_1, S_2, S_3 и источник S_1 расположены на одинаковых расстояниях от точки пересечения зеркал

Задача 1. Постройте изображение точечного источника света в двух плоских зеркалах, если угол между ними равен 90°. Сколько изображений получается? Как они расположены по отношению к прямой, по которой зеркала касаются друг друга?

Изобразим два плоских зеркала, образующих прямой угол. Поместим точечный источник света на биссектрисе прямого угла. Построим ход двух лучей, падающих на одно из зеркал (первое).

Мы специально выбрали второй луч, который после отражения от первого плоского зеркала падает на второе. Что это означает?

Изображение в зеркале обязано своим происхождением явлению отражения световых лучей, выходящих из источника. Но луч 3 реально существует, хотя и исходит из «мнимого» источника. Следовательно, во втором зеркале кроме изображения собственно источника света появляется изображение «изображения» этого источника в первом зеркале.

Точно также можно указать лучи, которые, отразившись от второго зеркала упадут на первое, формируя в нем изображение «изображения» источника во втором зеркале.

Остается определить где находятся эти изображения. Для этого проще всего воспользоваться свойством симметрии положения источника относительно зеркала.

Чтобы построить «изображение второго порядка» нужно продлить плоскость зеркала и снова воспользоваться правилом симметрии. Обратите внимание, эти «изображения второго порядка» наложились друг на друга. При этом все три изображения в такой системе зеркал и сам источник расположены симметрично относительно прямой, по которой зеркала соприкасаются. То есть лежат на окружности, радиус которой равен расстоянию от источника до линии соприкосновения зеркал. При этом угол, образованный радиусами, проходящими через соседние изображения (или изображение и источник) составляют 90°.

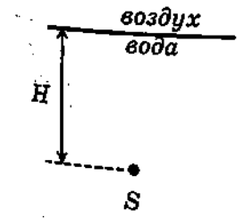
Нетрудно сообразить, что число изображений вместе с источником равно:

$$360^\circ : 90^\circ = 4.$$

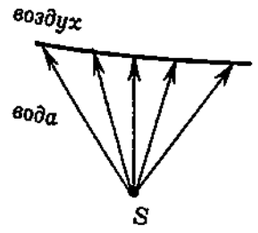
А число изображений равно:

$$N = \frac{360^\circ}{90^\circ} - 1, \quad \text{или} \quad N = \frac{360^\circ}{\alpha} - 1,$$

где α – угол между зеркалами (в градусах).



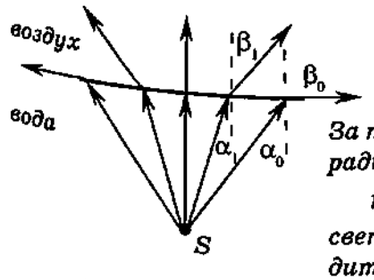
n — относительный показатель преломления воздуха, n < 1.



$$0^\circ < \alpha < 90^\circ$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_{\text{в воде}}}{v_{\text{в возд}}} = n < 1;$$

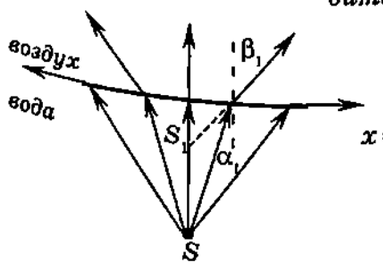
$$\frac{\sin\alpha_0}{\sin\beta_0} = \sin\alpha_0 = n < 1;$$



За пределами круга радиусом

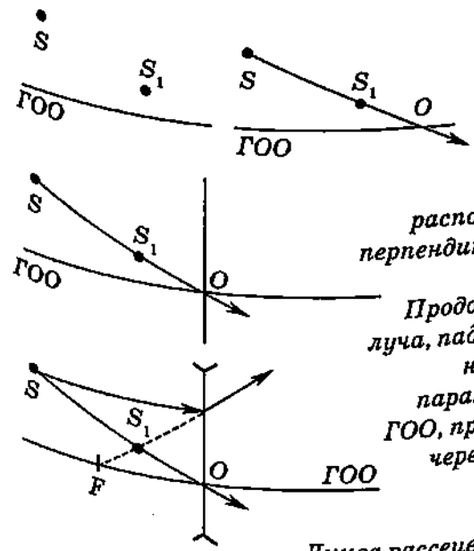
$$r = H \cdot \operatorname{tg}\alpha_0$$

свет из воды выходить не будет



$$x = h\operatorname{tg}\alpha = H\operatorname{tg}\beta$$

$$h = H\frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha};$$



Линза расположена перпендикулярно ГОО

Продолжение луча, падающего на линзу параллельно ГОО, проходит через фокус линзы.

Линза рассеивающая.

Задача 2. Точечный источник света находится на глубине H от свободной поверхности воды в озере. Каким увидит этот источник наблюдатель, пролетающий над озером на воздушном шаре?

Изображение источника на сетчатке глаза человека создадут лучи, которые вышли из источника и попали в глаз человека. Мозг человека «соберет» расходящийся пучок лучей в точку. Она и будет восприниматься как источник света.

Выполним построение. Лучи исходят от источника света по всевозможным направлениям. Покажем углы падения лучей на границу раздела «вода-воздух». Углы падения лежат в пределах от 0° до 90°.

Однако, не все они выйдут за пределы поверхности, так как луч света переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную. Следовательно, для всех лучей, угол падения которых на границу раздела этих сред превышает предельный угол полного отражения, наблюдается явление полного отражения света.

Значит, в глаза человека могут попасть только лучи, выходящие из воды в пределах круга, радиус которого можно найти геометрически.

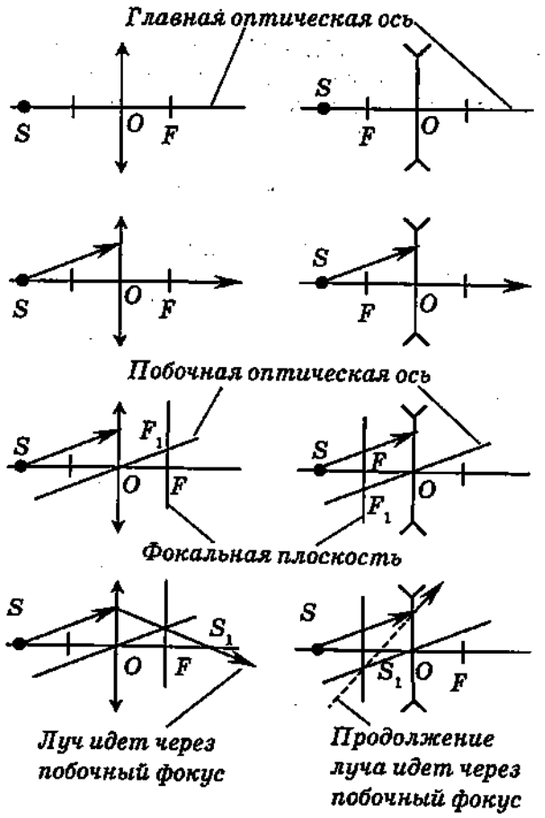
Продолжения выходящих в воздух лучей пересекаются в точке S_1, она и представляется человеку точечным источником света. Глубину, на которой находится этот «источник», нетрудно найти из геометрических соображений.

Задача 3. На рисунке показаны положения главной оптической оси линзы, источник света S и его изображение S_1 в линзе. Найдите построением положение оптического центра линзы и ее фокусов. Определите тип линзы.

Все лучи, выходящие из источника, после преломления в линзе проходят через изображение источника.

Для решения задачи воспользуемся тем, что источник и его изображение лежат на луче, который идет через оптический центр линзы. Следовательно, соединяя S и S_1 линией, мы найдем положение оптического центра линзы на ГОО и самой линзы.

Положение фокусов определим, изображая ход луча, падающего на линзу параллельно его ГОО. Ход этого луча определит и тип линзы.



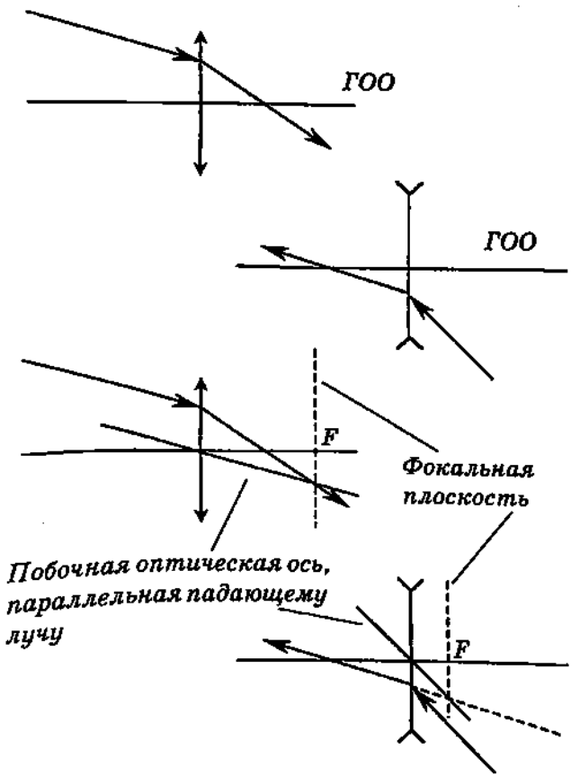
Задача 4. Построить изображение точки, лежащей на главной оптической оси собирающей, а затем рассеивающей линзы. Положение фокусов линз считать известными.

Чтобы построить изображение точки в линзе, нужно знать ход двух лучей, исходящих из точки и прошедших через линзу. Изображение источника лежит в точке пересечения этих лучей или их продолжений.

Когда источник света лежит на главной оптической оси, один луч идет вдоль главной оптической оси, остальные — по всевозможным направлениям. Но среди них нет «стандартных» лучей. Поэтому построение возможно, только если воспользоваться побочной оптической осью и свойством лучей, параллельных побочной оси.

Проведем из источника произвольный луч. Построим побочную ось, параллельную данному лучу, и найдем точку ее пересечения с фокальной плоскостью линзы. Выбранный нами луч после преломления в линзе пройдет через этот побочный фокус.

Теперь остается найти точку пересечения этого луча с ГОО, так как вдоль нее идет второй луч, вышедший из источника.



Задача 5. На рисунке показан ход произвольного луча в собирающей (рассеивающей) линзе и положение ее главной оптической оси и оптического центра. Найдите построением положение фокусов линзы.

Решение данной задачи основано на решении предыдущей задачи с использованием побочной оптической оси.

Главное свойство лучей, идущих параллельно выбранной побочной оптической оси состоит в том, что после преломления в линзе лучи (или продолжения лучей в рассеивающей линзе) пересекаются в одной точке.

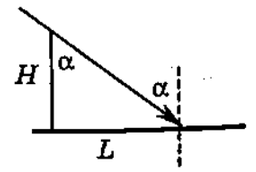
Эта точка — побочный фокус — лежит в фокальной плоскости.

Фокальная плоскость тонкой линзы перпендикулярна главной оптической оси. Следовательно, для решения задачи необходимо найти побочный фокус и по нему восстановить положение фокальной плоскости. А для этого сначала нужно провести побочную ось, параллельную падающему на линзу лучу. Точка пересечения побочной оси и преломленного линзой луча (или его продолжения) является побочным фокусом.

Расчетные задачи

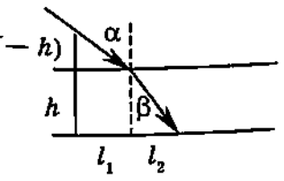
Дано:
воздух — вода
$H = 1{,}5$ м
$L = 2{,}6$ м
$h = 1$ м
l — ?

Табличные данные:
$n = 1{,}33$



Решение:

1. $\frac{L}{H} = \operatorname{tg}\alpha$;
2. $\frac{l_1}{H-h} = \operatorname{tg}\alpha$;
3. $\frac{l_2}{h} = \operatorname{tg}\beta$;



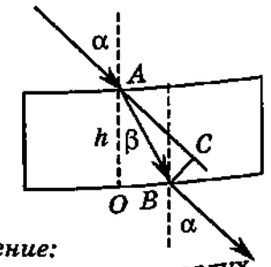
4. $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$; $\quad \sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n}$;
5. Из 1 и 2 получим: $\frac{L}{H} = \frac{l_1}{H-h}$

$l_1 = \frac{H-h}{H}L$; $\quad l_1 = \frac{1{,}5-1}{1{,}5}\cdot 2{,}6 \approx 0{,}9$ (м);

6. $\operatorname{tg}\alpha = \frac{2{,}6}{1{,}5} = 1{,}73$; $\quad \alpha = \operatorname{arc\,tg}1{,}73 = 60°$;
7. $\sin\beta = \frac{\sin 60°}{1{,}33} = \frac{0{,}87}{1{,}33} = 0{,}65$; $\quad \beta \approx 41°$.
8. $l_2 = h\operatorname{tg}\beta$; $\quad l_2 = 1\cdot \operatorname{tg}41° = 0{,}87 \approx 0{,}9$ (м).
9. $l = l_1 + l_2 = 0{,}9 + 0{,}9 \approx 1{,}8$ (м)

Ответ: длина тени на дне равна 1,8 м, то есть короче, чем на поверхности земли.

Дано:
воздух — стекло;
$n_1 = 1{,}6$
стекло — воздух;
$n_2 = 1/1{,}6$
$h = 4$ см
$\alpha = 60°$
d — ?



Решение:

1. воздух-стекло $\quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$

стекло-воздух $\quad \frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1} = n_{\text{возд отн стекла}}$;

$\alpha_1 = \beta$; $\quad n_{\text{возд отн стекла}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n}$

$\frac{\sin\beta}{\sin\beta_1} = \frac{1}{n}$; $\quad \sin\beta_1 = \sin\alpha$; $\quad \beta_1 = \alpha$.

Задача 6. Шест высотой 1,5 м отбрасывает в воздухе тень длиной 2,6 м. Какой будет длина тени от этого шеста, если его поставить вертикально на дно пруда глубиной 1 м?

Выполним построение тени шеста в двух случаях: когда он стоит на земле и когда помещен в пруд.

При построении учтем, что угол падения лучей на поверхность земли и на свободную поверхность воды в пруде одинаковы.

Определение размеров тени на поверхности земли связано со значением тангенса угла падения луча на нее. Поскольку размеры тени и длина шеста известны, это позволит определить угол падения лучей.

Длина тени шеста, поставленного в воду, складывается из двух слагаемых. Первый — длина тени, отбрасываемой той частью шеста, которая выступает над водой. Второе — длина тени оставшейся части шеста.

Для ее нахождения потребуется учесть факт преломления в воде луча света, идущего через верхний конец шеста. Угол преломления связан с углом падения (который нами уже найден) законом преломления.

Несложные алгебраические преобразования позволяют получить окончательный ответ.

(В подобных задачах удобнее сразу находить значение аргумента тригонометрической функции, а не проводить преобразования в общем виде, так как выкладки становятся очень громоздкими.)

Задача 7. Прямоугольная стеклянная пластинка толщиной 4 см имеет в воздухе показатель преломления 1,6. На ее поверхность падает луч света под углом 60°. Определить на сколько сместится луч после выхода из пластинки в воздух.

Выполним построение хода луча в плоскопараллельной пластинке.

Преломление луча происходит последовательно на двух границах раздела. Сначала луч входит из воздуха в стекло, падая на границу под углом α. Затем, падая на границу «стекло-воздух» под углом β, выходит в воздух под углом α.

AC — продолжение падающего из воздуха луча. BC = d — искомое боковое смещение луча, вышедшего из пластинки в воздух.

2. Из ΔABO: $AB=\dfrac{h}{\cos\beta}$;

а из ΔABC: $AB=\dfrac{d}{\sin(\alpha-\beta)}$;

$$d=\frac{h\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta}.$$

3. Воспользуемся формулой для синуса разности двух аргументов:

$$\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta}=\frac{\sin\alpha\cos\beta-\cos\alpha\sin\beta}{\cos\beta}=$$

$$=\sin\alpha\left(1-\frac{\cos\alpha\sin\beta}{\cos\beta\sin\alpha}\right)=\sin\alpha\left(1-\frac{1}{n}\cdot\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\right);$$

Воспользуемся основным тригонометрическим тождеством:

$$\frac{1}{n}\cdot\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}=\frac{1}{n}\cdot\frac{\sqrt{1-\sin^2\alpha}}{\sqrt{1-\sin^2\beta}}=\sqrt{\frac{1-\sin^2\alpha}{n^2-n^2\sin^2\beta}}=$$

$$=\sqrt{\frac{1-\sin^2\alpha}{n^2-\sin^2\alpha}};$$

Окончательно, получим:

$$d=h\sin\alpha\left(1-\sqrt{\frac{1-\sin^2\alpha}{n^2-\sin^2\alpha}}\right).$$

4. Проведем вычисления:

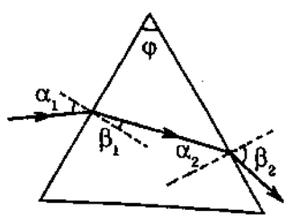
$$d=4\cdot\sin60^\circ\left(1-\sqrt{\frac{1-\sin^2 60^\circ}{1{,}6^2-\sin^2 60^\circ}}\right)=$$

$$=\frac{4\cdot\sqrt{3}}{2}\cdot\left(1-\sqrt{\frac{1-0{,}75}{2{,}56-0{,}75}}\right)=2\cdot1{,}73\cdot0{,}63=$$

$=2{,}2$ (см).

Ответ: боковое смещение луча составляет примерно 2,2 см.

Дано:
воздух-стекло
$n_{кр}=1{,}37$
$n_{ф}=1{,}42$
$\varphi=45^\circ$
$\beta_{2,кр}=0^\circ$
$\delta_{кр}$ — ?
$\delta_{ф}$ — ?



φ — преломляющий угол призмы;
α_1, β_1 — углы падения и преломления на первой преломляющей грани соответственно;
α_2, β_2 — углы падения и преломления на второй преломляющей грани соответственно.

Искомое боковое смещение луча является катетом прямоугольного треугольника ABC.

Этот катет лежит против угла, значение которого равно разности углов: $\alpha-\beta$.

Углы α и β связаны между собой по закону преломления на границе «воздух-стекло».

Гипотенузу AB этого прямоугольного треугольника ABC можно найти, так как она одновременно является гипотенузой другого прямоугольного треугольника ABO, один из углов которого равен углу преломления, а один из катетов — толщине пластинки.

Остается провести алгебраические преобразования и получить формулу для расчета значения бокового смещения в общем виде.

Анализ полученного результата показывает, что значение бокового смещения зависит от толщины пластинки, угла падения и показателя преломления.

При этом боковое смещение тем больше, чем больше толщина пластинки.

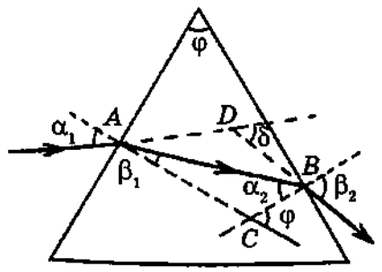
Если увеличивать угол падения, то и показатель преломления тоже увеличивается, так как синус угла увеличивается с ростом аргумента, значение подкоренного выражения уменьшается, а значение скобки возрастает.

При увеличении показателя преломления корень уменьшается, и значение бокового смещения увеличивается.

Результат этой задачи можно использовать для объяснения известного вам факта: использование тонкого стекла в окнах не приводит к искажению вида предметов, их боковое смещение мы на глаз не замечаем. Однако, локальные изменения толщины стекла хорошо заметны из-за искривления привычно прямых линий объектов.

Задача 8. Луч белого света падает на боковую поверхность равнобедренной призмы так, что красный луч выходит из нее перпендикулярно ко второй грани. Найти углы отклонения красного и фиолетового лучей от первоначального направления, если преломляющий угол призмы равен 45°. Показатели преломления призмы для красного и фиолетового света равны соответственно 1,37 и 1,42.

Решим сначала задачу об угле отклонения луча призмой в общем виде.



Решение:

1. Из треугольника ABC:

$$\varphi=\beta_1+\alpha_2.$$

2. Из треугольника ABD:

$$\delta=(\alpha_1-\beta_1)+(\beta_2-\alpha_2);$$

$$\delta=\alpha_1+\beta_2-(\beta_1+\alpha_2)=\alpha_1+\beta_2-\varphi.$$

3. По закону преломления света:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}=n;\qquad\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}=\frac{1}{n};$$

4. Рассмотрим ход луча красного цвета. Для него $\alpha_2=\beta_2=0$, так как по условию он выходит перпендикулярно второй грани. Тогда:

$$\varphi=\beta_1+\alpha_2=\beta_1;\qquad\delta=\alpha_1+\beta_2-\varphi=\alpha_1-\varphi.$$

Подставляя в закон преломления света, получим:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}=\frac{\sin\alpha_1}{\sin\varphi}=n;\quad\sin\alpha_1=n\sin\varphi;$$

$$\alpha_1=\arcsin(n\sin\varphi);$$

$$\alpha_1=\arcsin(1{,}37\cdot0{,}71)\approx77^\circ;$$

$$\delta_{кр}=77^\circ-45^\circ=32^\circ.$$

5. Рассмотрим ход луча фиолетового цвета.

$$\varphi=\beta_1+\alpha_2;\qquad\delta_{ф}=\alpha_1+\beta_2-\varphi=32^\circ+\beta_2;$$

$$\frac{\sin77^\circ}{\sin\beta_1}=1{,}42;\qquad\sin\beta_1=\frac{\sin77^\circ}{1{,}42}=0{,}69;$$

$$\beta_1=\arcsin0{,}69\approx43^\circ;$$

$$\alpha_2=\varphi-\beta_1=45^\circ-43^\circ=2^\circ.$$

$$\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}=\frac{1}{n_{ф}};$$

$$\sin\beta_2=n_{ф}\sin\alpha_2=1{,}42\cdot0{,}03=0{,}05;$$

$$\beta_2=\arcsin0{,}05\approx3^\circ;$$

$$\delta_{ф}=32^\circ+\beta_2=32^\circ+3^\circ=35^\circ.$$

Ответ: угол отклонения лучей красного цвета $\delta_{кр}=32^\circ$, фиолетового $\delta_{ф}=35^\circ$.

На рисунке сначала построим ход луча в призме, используя закон преломления света на каждой границе раздела сред.

Затем выполним дополнительные построения. Для этого сначала продолжим до пересечения перпендикуляры, восставленные в точках падения луча на обеих границах. В результате получим треугольник ABC, в котором два острых угла, прилежащих к основанию AB, являются соответственно углом преломления на первой грани и углом падения на вторую грань.

Внешний угол этого треугольника, не смежный с данными углами, равен φ, так как образован сторонами перпендикулярными преломляющим граням призмы, угол между которыми равен φ.

Затем продолжим до пересечения падающий на призму и выходящий из призмы лучи. Угол δ, являющийся внешним углом полученного треугольника ABD, — искомый угол отклонения луча призмой. Углы треугольника ABD, не смежные с данным, связаны простыми соотношениями с углами падения и преломления.

Пользуясь свойством внешнего угла треугольника, получим связь угла отклонения луча с углом падения и углом преломления на первой грани и с преломляющим углом призмы.

Теперь запишем закон преломления на каждой границе. Мы получили четыре уравнения, совместное решение которых позволяет найти угол отклонения луча, если известен угол падения, значение преломляющего угла призмы и показатель преломления света.

Применим полученный результат для частного случая, рассматриваемого в нашей задаче. Для красного света нам известны углы падения и преломления на второй грани. Это позволяет сразу найти угол преломления луча красного цвета на первой грани. Он равен преломляющему углу призмы. Записывая закон преломления для первой грани, находим угол падения луча белого света на призму и угол отклонения луча красного цвета.

Для луча фиолетового цвета сначала находим угол преломления на первой грани, так как известны угол падения и показатель преломления. Затем находим угол падения на вторую грань и рассчитываем угол преломления на ней. Найдя угол преломления на второй грани, рассчитаем угол отклонения луча фиолетового цвета призмой.

Дано:
собирающая линза
$d > F$
$L = 120$ см
$F = 25$ см
d — ?
Γ — ?

Решение:

1. Запишем формулу линзы:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}.$$

2. По условию задачи: $d+f=L$ или

$$f=L-d.$$

3. $\frac{1}{d}+\frac{1}{L-d}=\frac{1}{F}$; $\frac{L-d+d}{d(L-d)}=\frac{1}{F}$;

$LF=dL-d^2$; $d^2-dL+LF=0$;

$$d_{1,2}=\frac{L\pm\sqrt{L^2-4LF}}{2};$$

4. Выполним расчеты:

$$d_{1,2}=\frac{120\pm\sqrt{120^2-4\cdot120\cdot25}}{2}=\frac{120\pm49}{2};$$

$d_1 = 84{,}5$ (см); $d_2 = 35{,}5$ (см).

5. Увеличение линзы составляет $\Gamma = \frac{f}{d}$,

следовательно: $\Gamma_1 = \frac{f_1}{d_1}=\frac{35{,}5\text{ см}}{84{,}5\text{ см}}=0{,}4$;

$$\Gamma_1 = \frac{f_2}{d_2}=\frac{84{,}5\text{ см}}{35{,}5\text{ см}}=2{,}4.$$

Ответ: $d_1 = 84{,}5$ см; $\Gamma_1 = 0{,}4$ (изображение уменьшенное); $d_2 = 35{,}5$ см; $\Gamma_1 = 2{,}4$ (изображение увеличенное).

Дано:
две тонкие линзы
F_1
F_2
L
$d_1 = d$
f — ?
F_1 — ?

Решение:

1. Запишем формулу тонкой линзы для первой линзы системы:

$$\frac{1}{d_1}+\frac{1}{f_1}=\frac{1}{F_1} \quad \text{или} \quad \frac{1}{d}+\frac{1}{f_1}=\frac{1}{F_1}.$$

Задача 9. Расстояние между предметом и экраном 120 см. Где нужно поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием 25 см, чтобы на экране получилось четкое изображение предмета? Каково увеличение линзы?

Для решения этой задачи обратим внимание на следующие факты.

Первый: получаем изображение предмета на экране, следовательно, это изображение действительное. Значит, расстояние от предмета до линзы больше фокусного.

Второй: так как расстояние от предмета до экрана равно сумме расстояний от предмета до линзы и от линзы до изображения, а ход лучей в линзе обратим, то задача имеет два решения. Следовательно, уравнение, позволяющее найти искомое расстояние должно быть квадратным.

Запишем формулу линзы и подставим в нее расстояния от линзы до изображения, выразив его через расстояние от предмета до экрана и расстояние от предмета до линзы.

После несложных преобразований получим квадратное уравнение относительного искомого расстояния.

Решая его, получим два корня. Интерпретация полученного рзультата очевидна.

Увеличением линзы называется отношение высоты изображения к высоте предмета. Оно равно отношению расстояния от линзы до изображения к расстоянию от предмета до линзы.

Следовательно, для каждого случая получаем свое увеличение: в первом случае изображение уменьшенное, во втором — увеличенное, что полностью согласуется с обратимостью хода лучей.

Задача 10. Главные оптические оси двух тонких линз, фокусные расстояния которых равны соответственно F_1 и F_2, совпадают. Линзы находятся на расстоянии L друг от друга. Светящаяся точка находится на расстоянии d от первой линзы. На каком расстоянии от второй линзы получится изображение, даваемое системой этих линз? Найдите фокусное расстояние и оптическую силу этой системы линз.

Для решения данной задачи можно воспользоваться тем же приемом, которым мы пользовались при выводе формулы тонкой линзы, рассматривая преломление на двух сферических поверхностях. А именно:

2. Полученный предмет находится от второй линзы на расстоянии:

$$d_2 = L - f_1,$$

если $d_2 > 0$, то предмет действительный;
если $d_2 < 0$, то предмет мнимый.

3. Запишем формулу линзы для второй линзы системы:

$$\frac{1}{d_2}+\frac{1}{f_2}=\frac{1}{F_2}; \quad f_2 = f; \quad \frac{1}{L-f_1}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F_2}.$$

4. Выразим расстояние f:

$$\frac{1}{L-\frac{dF_1}{d-F_1}}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F_2}; \quad \frac{1}{f}=\frac{1}{F_2}-\frac{1}{L-\frac{dF_1}{d-F_1}};$$

$$f=\frac{\left(L-\frac{dF_1}{d-F_1}\right)\cdot F_2}{L-\frac{dF_1}{d-F_1}-F_2}=\frac{(Ld-LF_1-dF_1)\cdot F_2\cdot(d-F_1)}{(d-F_1)\cdot(Ld-LF_1-dF_1-dF_2+F_1F_2)}=$$

$$=\frac{F_2\cdot\left[Ld-F_1(L+d_1)\right]}{d(L-F_1-F_2)+F_1(F_2-L)};$$

5. Найдем фокусное расстояние системы:

$$\frac{1}{d_2}+\frac{1}{f_2}=\frac{1}{F_2}; \quad \frac{1}{L-F_1}+\frac{1}{F_1}=\frac{1}{F_2};$$

$$\frac{1}{F_1}=\frac{1}{F_2}-\frac{1}{L-F_1}; \quad \frac{1}{F_1}=\frac{1}{F_1-L}+\frac{1}{F_2}.$$

6. Аналогично, если свет падает сначала на вторую линзу, то:

$$\frac{1}{F_{II}}=\frac{1}{F_2-L}+\frac{1}{F_1} \quad \text{и} \quad F_{II}\neq F_I!$$

7. Если $L = 0$, то $\frac{1}{F_I}=\frac{1}{F_{II}}=\frac{1}{F_1}+\frac{1}{F_2}$;

$$D_{\text{системы}} = D_1 + D_2.$$

Дано:
$H = 100$ км
$F = 10$ см
$l_0 = 10^{-2}$ мм
h — ?
τ — ?

СИ:
10^5 м
0,1м
10^{-5} м

Решение:

1. Так как расстояние от фотографируемого предмета до объектива камеры значительно больше ее фокусного расстояния, то можно считать, что изображение получается в фокальной плоскости.

будем считать, что изображение, которое дает первая линза системы является «предметом» для второй. Этот «предмет» может быть как действительным, так и мнимым.

Расстояние от этого предмета до второй линзы равно $d_2 = L - f_1$. Если это число положительно, то «предмет» для второй линзы — действительный, если отрицательно, то — мнимый.

Запишем формулу тонкой линзы для второй линзы. Подставляя в нее соответствующие значения величин, получим уравнение, которое позволит найти расстояние, на котором находится изображение предмета в данной системе линз.

Фокусное расстояние данной системы линз найдем из определения. Пусть на первую линзу падает параллельный пучок лучей, идущих вдоль главной оптической оси. Тогда $d_1 = \infty$, $f_1 = F_1$ и $f_2 = F_1$. Поэтому из выражения (1) следует, что фокусное расстояние системы зависит от фокусных расстояний линз и расстояния между ними, а также от того, со стороны какой линзы падает на систему пучок параллельных лучей. Это значит, что фокусные расстояния системы линз, которые раздвинуты на некоторое расстояние, неодинаковы и зависят от направления световых пучков!

Однако, если линзы сдвинуть вплотную, то есть сделать расстояние $L = 0$, то величина, обратная фокусному расстоянию системы, равна сумме величин, обратных фокусным расстояниям каждой из линз. Иначе говоря, оптическая сила системы тонких линз, приведенных в контакт, равна сумме оптических сил линз системы.

Наши выводы в равной мере относились как к собирающим, так и к рассеивающим линзам. Более того, этот вывод можно обобщить на любое число тонких линз, приведенных в соприкосновение и составляющих оптическую систему.

Задача 11. Поверхность Земли фотографируют со спутника, запущенного на высоту 100 км. Объектив фотокамеры имеет фокусное расстояние 10 см. Минимальный размер различимых деталей на пленке (разрешающая способность пленки) 10^{-2} мм. Определить: а) минимальные размеры предметов на Земле, которые будут видны на пленке; б) время экспозиции, при котором орбитальное движение спутника не влияет на качество изображения.

2. Запишем формулу тонкой линзы для данного частного случая:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F};\quad d=H>>F;\quad \frac{1}{d}\approx 0;\quad f=F.$$

3. Увеличение фотокамеры равно:

$$\Gamma=\frac{l_0}{h}=\frac{f}{d};\qquad \frac{l_0}{h}=\frac{F}{d};\qquad \frac{l_0}{h}=\frac{F}{H};$$

$$h=\frac{l_0}{F}\cdot H.$$

4. За время t_0 точка на Земле сместится по отношению к камере на $\Delta l=v_1\cdot t_0$. Тогда:

$$\frac{l_0}{\Delta l}=\frac{F}{H};\qquad \frac{l_0}{v_1\cdot t_0}=\frac{F}{H};\qquad t_0=\frac{l_0 H}{v_1 F}.$$

5. Проведем вычисления:

$$h=\frac{10^{-5}\text{ м}}{0{,}1\text{ м}}\cdot 10^5\text{ м}=10\text{ м};$$

$$t_0=\frac{10^{-5}\text{ м}\cdot 10^5\text{ м}}{8\cdot 10^3\text{ м/с}\cdot 0{,}1\text{ м}}=1{,}25\cdot 10^{-3}\text{ с}.$$

Ответ: минимальный размер предмета на Земле, который можно сфотографировать данной камерой имеет размеры $h=10$ м, при фотографировании время экспозиции не должно превышать $t_0=1{,}25$ мс.

Дано:
очки
$L=16$ см
$d_0=25$ см
$D-?$

Решение:

1. Запишем формулу линзы:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=D,$$

$d=d_0;\qquad f<0,\qquad f=-L,$

Таким образом, получим:

$$\frac{1}{d_0}+\frac{1}{-L}=D;$$

$$\frac{1}{d_0}-\frac{1}{L}=D;\qquad D=\frac{L-d_0}{Ld_0}.$$

2. Проведем вычисления:

$$D=\frac{16\text{ см}-25\text{ см}}{16\text{ см}\cdot 25\text{ см}}=-\frac{9}{16\cdot 25\text{ см}}\cdot\frac{1}{}=$$

$$=-\frac{9}{16\cdot 25}\cdot\frac{1}{10^{-2}\text{ м}}=-2{,}25\text{ дптр}.$$

Объектив фотокамеры дает действительное уменьшенное изображение предмета в фокальной плоскости.

Самый маленький на Земле предмет, который еще можно зафиксировать на пленке, дает на пленке изображение равное разрешающей способности пленки, то есть минимальному размеру различимых на пленке деталей. Следовательно, применяя формулу линзы для частного случая, когда $d>>F$, и формулу для расчета увеличения линзы, найдем минимальные размеры таких предметов на Земле.

Орбитальное движение спутника по орбите не будет влиять на качество изображения, если за время экспозиции (то есть время, в течение которого свет от объекта поступает в фотокамеру) изображение любой точки предмета не сместится на расстояние, меньшее или равное разрешающей способности пленки.

Полагая, что на этой высоте спутник движется со скоростью, равной первой космической, рассчитаем расстояние, на которое сместится тело на Земле по отношению к спутнику за время экспозиции. «Изображение» этого линейного смещения на пленке также не должно превышать минимальный размер различимых деталей на пленке.

Задача 12. Мальчик, сняв очки, читал книгу, держа ее на расстоянии 16 см от глаз. Какой оптической силы у него очки?

Линзы очков должны создать прямое (а значит, обязательно мнимое) изображение рассматриваемого предмета на таком расстоянии от глаза, которое позволяет его оптической системе создать изображение на сетчатке.

Мальчик держит книгу на таком расстоянии (16 см), потому что при этом изображение текста получается примерно на сетчатке глаза. Значит, очки должны иметь такую оптическую силу, чтобы создавать мнимое изображение на расстоянии 16 см от оптического центра глаза, когда сама книга находится на расстоянии наилучшего зрения, то есть на расстоянии 25 см.

Значит, для линз очков нам известно расстояние от предмета до линзы и расстояние от линзы до изображения, причем мнимое. Эти данные позволяют рассчитать оптическую силу очков и определить их тип. В данном случае очки исправляют близорукость, так как $D<0$.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ

1. Однородная среда
2. Точечный источник
3. Луч
4. Когерентные источники света
5. Монохроматический свет
6. Спектр
7. Тонкая линза
8. Фокальная плоскость

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

1. Равномерное прямолинейное распространение света в любой однородной среде

ПРИНЦИПЫ

Принцип Гюйгенса: каждая частица среды, до которой дошло возбуждение, становится источником вторичных сферических волн.

ЗАКОНЫ

1. Закон прямолинейного распространения света
2. Закон отражения света
3. Закон преломления света

ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

1. Отражение	Наблюдается на границе раздела между непрозрачными и прозрачными средами	Свет возвращается в ту область пространства, откуда он падает на границу, но под другим углом	$\beta=\alpha$
2. Преломление	Наблюдается на границе раздела с другим прозрачным телом	Свет проникает в другую среду, изменяя направление своего распространения	$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=n_{2,1}$
3. Полное отражение	Наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, когда угол падения луча больше предельного угла полного отражения	Свет не проникает внутрь другой прозрачной среды, а скользит вдоль границы раздела двух сред при угле падения, равном предельному, или полностью возвращается в первую среду при больших значениях угла падения	$\sin\alpha_0=n_{2,1};$ $\beta_0=90°$
4. Интерференция	Наблюдается при распространении света от нескольких источников. Устойчивая картина наблюдается, когда источники света когерентны	Свет когерентных источников перераспределяется в пространстве так, что в некоторые точки (минимумы) не поступает вообще, а в других (максимумы) наблюдается усиление света	max: $\Delta d=k\cdot\lambda,$ min: $\Delta d=(2k+1)\frac{\lambda}{2},$ $k=0,1,2,\ldots$
5. Дифракция	Наблюдается при взаимодействии с телами, размеры которых сравнимы с длиной световой волны или на больших расстояниях от преград	Свет проникает в область геометрической тени предмета, которая оказывается неоднородной: вблизи границ тени происходит перераспределение энергии, максимумы чередуются с минимумами	$d\sin\varphi=k\lambda$ (для дифракционной решетки)
6. Поляризация	Наблюдается при прохождении света через кристаллы, способные выделять из естественного света волны, имеющие определенное направление вектора напряженности электромагнитного поля	Ослабляется интенсивность света при прохождении через кристалл из-за поглощения. Поляризованный свет совсем не проходит через прозрачный кристалл при определенной ориентации кристалла в пространстве	
7. Дисперсия	Наблюдается при прохождении белого или другого немонохроматического света через любую прозрачную среду, кроме вакуума	Белый (немонохроматический) свет разлагается в спектр: свет разного цвета испытывает преломление под разными углами (у красного света угол преломления больше, чем у фиолетового)	$\alpha=\text{const}$ $\beta_{кр}>\beta_{ф};$ $v_{кр}>v_{ф}$

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

До сих пор мы изучали явления, связанные с распространением света и явлениями, происходящими на границе раздела двух сред. При этом мы имели в виду, что свет испускают источники света и свет несет с собой энергию. Однако, проблему излучения света мы не рассматривали.

Если обратиться к повседневному опыту, то можно утверждать, что «появление» света связано с процессами, происходящими в веществе, или более точно, внутри атомов вещества. Из курса физики основной школы вам известно, что внутри атома имеются заряженные частицы — электроны, которые движутся с ускорением. А из курса электродинамики известно, что электромагнитные волны излучаются заряженными частицами, движущимися с ускорением. Свет, по современным представлениям, имеет электромагнитную природу. Следовательно, «источники» света действительно нужно искать внутри вещества.

Вы уже знакомились ранее с «устройством» атома и механизмом излучения света и хорошо знаете, что света внутри атома нет, как нет его в незажженой свече или лампочке накаливания, как нет звука внутри камертона или скрипки. Подобно камертону, который начинает звучать, когда по нему ударяют молоточком, свет испускается тогда, когда внешнее воздействие выведет атомы вещества из обычного (основного) состояния в возбужденное. То есть атомы начинают излучать свет, когда им передадут энергию извне. Чтобы вещество излучало свет постоянно, к нему постоянно нужно подводить энергию.

Можно назвать несколько известных вам способов подведения энергии, которые приводят к излучению света веществом.

Первый — тепловой. Он является наиболее распространенным в природе. Чем выше температура тела, тем быстрее движутся атомы. При столкновениях атомов (молекул) друг с другом часть их кинетической энергии переходит в энергию возбуждения атомов, которые затем излучают свет. Тепловое излучение — это излучение Солнца и звезд, лампы накаливания, пламени свечи. Его испускают все тела (жидкие, твердые и газообразные) нагретые до температуры выше 0К, а свет — выше 800°С.

Другой вид излучения носит название электролюминесценции. В нем энергия передается атомам электронами, которые движутся с большими скоростями. При взаимодействии с атомами они передают им часть своей кинетической энергии, достаточную для возбуждения атомов. Эту скорость электроны набирают, двигаясь в электрическом поле. Свечение газов в газоразрядных трубках, северное сияние — это электролюминесцентное излучение.

Для вас важным источником информации стали компьютер и телевизор. Их экраны светятся благодаря катодолюминесценции — процессу излучения света атомами твердого тела под действием «ударов» быстро движущихся электронов.

А в природе вы, возможно, наблюдали хемилюминесценцию — свечение светлячка, некоторых видов водорослей, гнилушек и т.п. Это излучение возникает при некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть которой непосредственно излучается в виде света.

Наконец, многие вещества способны светиться в процессе или после облучения их светом, ультрафиолетовым или рентгеновским излучением. Это свечение получило название фотолюминесценции. В полном соответствии с законом сохранения энергии излучаемый при фотолюминесценции свет имеет несколько меньшую частоту, чем падающий. Так, в лампах дневного света коротковолновое излучение газового разряда заставляет светиться люминофор, покрывающий внутреннюю поверхность лампы.

Перечисленные выше виды излучения подробно изучались многими исследователями. В ходе этих опытов были сделаны открытия, которые сыграли важную роль в дальнейшем изучении природы света и его свойств. В частности, было установлено, что нагретые до высоких температур твердые тела, жидкости и газы при высоких давлениях дают сплошной спектр излучения, подобный белому свету Солнца. А вот нагретый разреженый газ или холодный газ, светящийся в газоразрядной трубке, дает линейчатый спектр. При этом у каждого сорта атомов этот спектр состоит из вполне определенных и всегда одних и тех же линий.

Так при исследовании излучения и поглощения света веществом впервые были обнаружены квантовые свойства света. Они и станут теперь предметом нашего изучения.

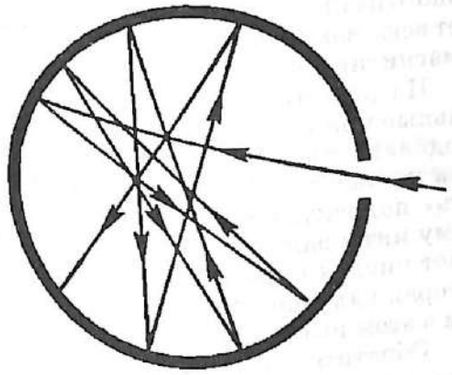
§ 21. ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ. ПОНЯТИЕ КВАНТА

***Тепловое излучение** — электромагнитное излучение, которое испускают все тела, имеющие температуру выше 0К, за счет собственной внутренней энергии*

T = const — температура тела

В этой полости тела имеется тепловое излучение, которое находится в состоянии термодинамического равновесия с телом

***«Абсолютно черное тело»** — модель тела, которое испускает и поглощает тепловое излучение всевозможных частот*



***Модель строения вещества:** вещество состоит из линейных электромагнитных осцилляторов, испускающих и поглощающих тепловое излучение всевозможных частот*

М. Планк (1858 — 1947)

Мы уже упоминали о том, что тепловое излучение является наиболее распространенным в природе видом излучения. Его изучение относится к концу XIX века, когда строение атома еще не было известно, но классическая электродинамика уже получила экспериментальное подтверждение. Тепловое излучение занимает особое место еще и потому, что оно может находиться в термодинамическом равновесии с телом, которое его излучает.

Представьте себе тело, внутри которого имеется полость. Пусть это тело имеет постоянную температуру.

Тогда внутри полости находится тепловое излучение, находящееся в тепловом равновесии с этим телом: электромагнитная энергия, излучаемая телом в единицу времени внутри этой полости, равна энергии, поглощаемой этим телом за это же время.

Равновесному излучению приписывают ту же температуру, которую имеет тело. Так, если температура тела равна 273 К, то говорят, что излучение, находящееся в полости, также имеет температуру 273 К.

При этом равновесное тепловое излучение одной температуры, созданное разными телами, имеющими такую же температуру, должно быть одинаковым: у этого излучения распределение энергии по частотам и плотность энергии излучения должны быть одинаковыми. Отсюда — модель такого излучающего тела: **абсолютно черное тело.** Абсолютно черное тело способно излучать и поглощать электромагнитные волны (излучение) всевозможных частот.

Согласно классической электродинамике (вспомните опыты Г. Герца) излучают электромагнитные волны вибраторы и принимают их (вспомните явление резонанса!) точно такие же вибраторы: колебательные системы электромагнитной природы. Вот и было высказано предположение, что внутри вещества имеются «элементарные вибраторы» — их назвают также гармоническими линейными электромагнитными осцилляторами (от латинского слова «oscillo» — качаюсь). Они испускают тепловое излучение и поглощают его. Таким образом и достигается тепловое равновесие. Такую модель вещества, способного испускать и поглощать тепловое (электромагнитное) излучение, предложил выдающийся немецкий физик М. Планк.

Плотность энергии электромагнитного поля:

$$w_{эл} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}; \qquad w_{магн} = \frac{B^2}{2\mu_0};$$

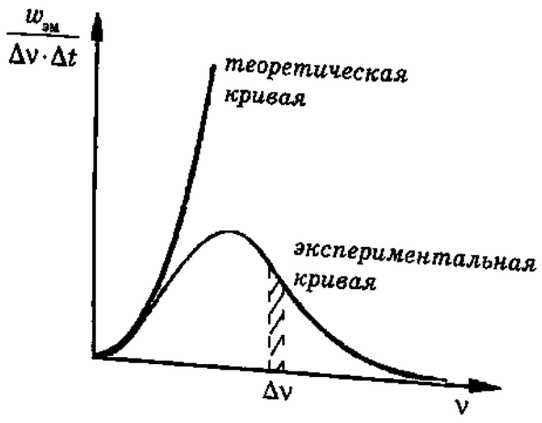
$$w_{эл\text{-}магн} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

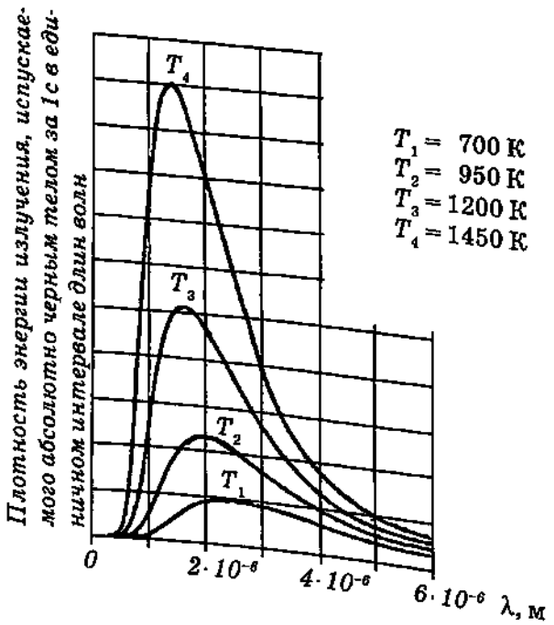
В электромагнитной волне:

$$\vec{E} \sim \frac{\Delta\vec{B}}{\Delta t}; \quad \left|\frac{\Delta\vec{B}}{\Delta t}\right| \sim \omega^2; \quad E \sim \omega^2;$$

$$\vec{B} \sim \frac{\Delta\vec{E}}{\Delta t}; \quad \left|\frac{\Delta\vec{E}}{\Delta t}\right| \sim \omega^2; \quad B \sim \omega^2$$

$$w_{эл\text{-}магн} \sim \omega^4$$





Каждый осциллятор имеет свою собственную частоту излучения. А энергия электромагнитных волн, как вы помните, зависит от четвертой степени частоты.

Поэтому можно попытаться найти теоретически зависимость плотности энергии теплового излучения от температуры тела и частоты излучения. А затем провести опыты и определить, как распределена энергия теплового излучения по частоте у тела данной температуры.

Теоретические предсказания показывают, что по мере увеличения частоты излучения плотность энергии теплового излучения должна увеличиваться. А так как абсолютно черное тело способно излучать все частоты вплоть до сколь угодно высоких, то общая энергия излучения оказывается сколь угодно большой. Но это означает, что тело любой температуры должно излучать (и терять) энергию до тех пор, пока его температура не снизится до абсолютного нуля!

Однако в действительности ничего подобного не происходит: тело вовсе не расходует всю свою энергию на излучение электромагнитных волн.

На рисунке показаны экспериментальные кривые, показывающие, как распределена плотность энергии нагретого тела по частоте. Если на графике «вырезать» полоску, соответствующую небольшому интервалу частот Δν, то ее площадь будет численно равна плотности энергии, которая излучается абсолютно черным телом в этом интервале частоты.

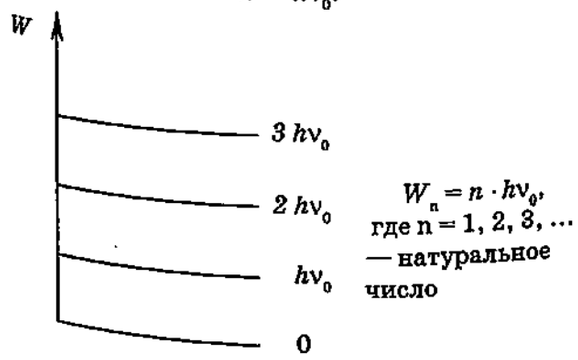
Обратите внимание, что по мере увеличения частоты излучения сначала происходит увеличение плотности энергии. Затем, начиная с некоторого значения частоты, происходит довольно быстрое уменьшение плотности энергии с ростом частоты излучения до нуля. Если увеличить температуру тела, то максимум кривой смещается в сторону увеличения частоты, но форма кривой сохраняется.

Такое распределение плотности энергии теплового излучения по частоте принципиально противоречит рассматриваемой модели вещества и выводам классической электродинамики. Наиболее существенными эти противоречия оказываются в области высоких, «ультрафиолетовых» частот, поэтому сложившаяся к концу XIX века ситуация в физике получила название «ультрафиолетовой катастрофы»: классическая электродинамика оказалась неспособной объяснить закономерности теплового (электромагнитного!) излучения тел.

Гармонический осциллятор:

1. *Неклассический объект;*
2. *Энергия не может принимать любые значения;*
3. *Энергия может меняться только скачками, квантами;*
4. *Минимальная порция энергии прямо пропорциональна частоте излучения:*

$$W = h\nu_0.$$



Постоянная Планка

1. Обозначение: h
2. $[h] = Дж \cdot с$
3. $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

Абсолютная температура — мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества:

$$\overline{W} = \frac{3}{2}kT,$$

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\frac{Дж}{К},$$

постоянная Больцмана

При температуре 300 К средняя кинетическая энергия теплового движения равна:

$$\overline{W} = \frac{3}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\frac{Дж}{К} \cdot 300\,К = 6{,}2 \cdot 10^{-19} Дж$$

Если осциллятор имеет собственную частоту ν_0, то при

$h\nu_0 \gg \overline{W}$ — *осциллятор не возбуждается и энергию не излучает;*

$h\nu_0 \leq \overline{W}$ — *осциллятор возбуждается и энергию излучает;*

М. Планк первым понял, что выходом из «ультрафиолетовой катастрофы» может стать отказ от применения классической электродинамики к микроскопическим объектам — гармоническим осцилляторам внутри вещества.

На языке современной физики это можно сказать так: классическая электродинамика имеет свои границы применимости. Эти границы, вообще говоря, определяет опыт. Опыт применения классической электродинамики к электромагнитным волнам радиодиапазона, которые испускаются макроскопическими телами, демонстрирует блестящее согласие с теоретическими предсказаниями.

Применение этой теории к новым объектам (микроскопическим) обнаружило несоответствия с экспериментом. Следовательно, исследуя электромагнитное излучение атомов (гармонических осцилляторов), нужно искать новые идеи, формулировать новые гипотезы, а затем проверять их на опыте. Именно так и развивается научное знание об окружающем мире.

Вот М. Планк и выдвинул гипотезу о том, что **энергия простейшего гармонического осциллятора не может принимать любые значения.**

При собственной частоте колебаний ν_0 она может принимать дискретные (то есть не непрерывные) значения, равные: $W = h\nu \cdot n$, где $n = 1, 2, \ldots$ — натуральные числа, а коэффициент пропорциональности h — постоянное число, которое Планк вычислил на основании математического анализа кривых распределения плотности энергии теплового излучения в зависимости от частоты. Впоследствии эта постоянная, — одна из универсальных физических постоянных микромира, получила его имя — «постоянная Планка».

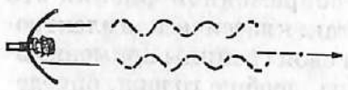
Гипотеза Планка позволила объяснить, почему плотность энергии теплового излучения сначала увеличивается, а затем уменьшается с ростом частоты. Действительно, осциллятор начинает излучать, когда получает энергию. Откуда он ее «берет»? Он приобретает ее в результате взаимодействия атомов при тепловом движении. Но средняя кинетическая энергия теплового движения, как вы помните из курса физики основной школы, зависит от

Такой энергии достаточно, чтобы:

Радио

Кванты слишком малы для показа

привести молекулы вещества во вращение;

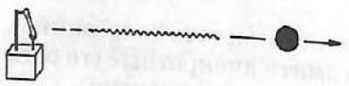


Инфракрасное излучение (печи, рефлектора и пр.)

заставить молекулы совершать колебательное движение;

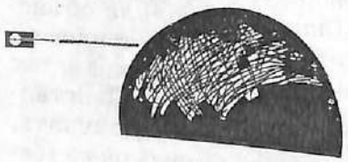
Ультрафиолетовое излучение кварцевой лампы

ионизировать атомы вещества;



Рентгеновские лучи

Гамма-лучи



разрушить ядро атома

На рисунках этого ряда объем изображенного шара примерно показывает энергию одного кванта соответствующей частоты

абсолютной температуры: температура выступает мерой средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества.

Чтобы возбудить осциллятор, нужна минимальная энергия, равная $h\nu_0$. Следовательно, излучение данной частоты может происходить, начиная с некоторого значения температуры тела. Конечно, среди множества молекул всегда найдутся такие, у которых энергия выше среднего значения. Они способны возбудить колебания осцилляторов с большей частотой. Но число таких молекул относительно невелико, поэтому в области больших частот излучается сравнительно немного энергии.

При увеличении температуры максимум кривой распределения смещается в область более высоких частот. Это можно визуально наблюдать, постепенно увеличивая температуру нагретого тела. Сначала никакого свечения незаметно (тепловое излучение инфракрасного диапазона), затем тело излучает свет красного цвета и так далее до «белого каления» при увеличении температуры тела.

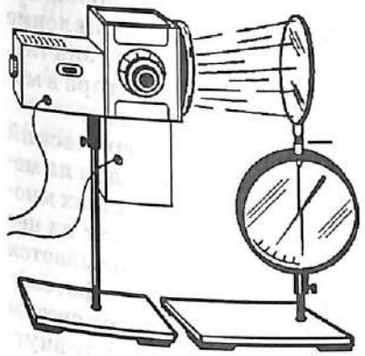
Но если энергия излучающего осциллятора принимает дискретные значения, то можно сделать вывод о том, что осциллятор и излучает электромагнитную энергию порциями — квантами, ведь его энергия может меняться только скачками на величину $h\nu_0$. Тогда энергия кванта равна $W = h\nu_0$, то есть прямо пропорциональна первой степени частоты излучения.

Предложив такой продуктивный выход из «ультрафиолетовой катастрофы», предложив идею об излучении электромагнитных волн квантами, М. Планк, однако, не смог решиться на этот вывод, противоречащий классической электродинамике Максвелла. Слишком велики были авторитет этого ученого и успехи практического применения электродинамики.

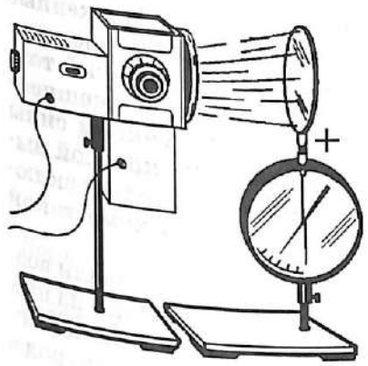
Кроме того, оставалось много неясного: например, почему колеблющееся (пусть и микроскопическое) тело не может иметь любые значения энергии и каким образом «непрерывные» электромагнитные волны могут излучаться отдельными порциями?

Дальнейшее изучение процессов испускания и поглощения света атомами, полностью подтвердило справедливость гипотезы Планка, а введение понятия «кванта» послужило началом развития совершенно новой, до сих пор не завершенной, физической теории — квантовой физики.

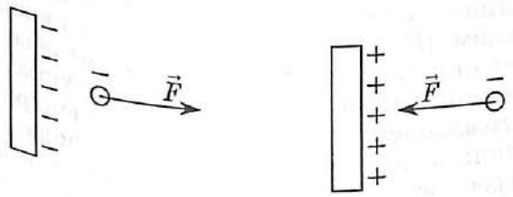
§ 22. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. ОПЫТЫ А. Г. СТОЛЕТОВА



Электрометр, заряженный отрицательно, быстро разряжается при освещении светом от электрической дуги



Электрометр, заряженный положительно, не разряжается при освещении светом электрической дуги



А. Г. Столетов (1839 — 1896)

Важнейшую роль в развитии квантовых представлений о природе света сыграло явление, которое было открыто и описано Г. Герцем в его знаменитых опытах, и впоследствии подробно изучено русским физиком А. Г. Столетовым. Это явление получило название фотоэлектрического эффекта или, сокращенно, фотоэффекта.

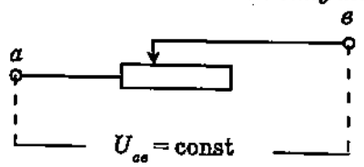
Г. Герц, как вы помните, исследовал свойства электромагнитных волн. Для этого важно было обеспечить надежный прием электромагнитных волн, испущенных вибратором Герца. Пытаясь улучшить условия приема электромагнитных волн, Герц попробовал облучать шарики приемного вибратора ультрафиолетовым светом. Так он сделал открытие, значение которого в истории физики трудно переоценить. Герц не исследовал это явление, а просто описал его как наблюдаемый факт: если облучать шарики приемного вибратора ультрафиолетовыми лучами, то прием волны становится устойчивым и надежным.

А. Г. Столетов в 1888 году «переоткрыл» фотоэффект. Он обнаружил, что заряженный отрицательным зарядом электрометр быстро теряет заряд, если облучать светом электрической дуги цинковую пластину, присоединенную к нему. В то же время электрометр, имеющий положительный заряд, не меняет своего заряда при таком же облучении ультрафиолетовым светом.

Данное явление нетрудно объяснить, если допустить, что свет «вырывает» с поверхности металлической пластины электроны. Действительно, если свет «вырвал» электрон, то в дальнейшем под действием электрического поля пластины он движется от поверхности пластины, удаляясь от нее. Если же электрон вырывается с поверхности положительно заряженной пластины, то немедленно возвращается на нее электрическим полем.

Это предположение позволяет объяснить и эффект улучшения условия приема электромагнитных волн вибратором Герца. Свет выбивает электроны из шариков вибратора. Поскольку до этого момента приемный вибратор был электрически нейтральным, то слабое поле вибратора, который «потерял» некоторое количество электронов и получившего небольшой положительный заряд, не сразу «возвращает» электроны в вибратор.

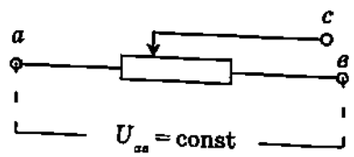
Реостат позволяет изменять силу тока



$$I_{ав} = \frac{U_{ав}}{R_{ав}} \neq \text{const},$$

так как $R_{ав} \neq \text{const}$

Потенциометр позволяет изменять напряжение между точками a и c



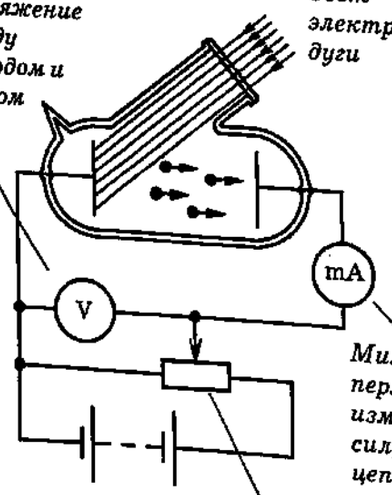
$$I_{ав} = \frac{U_{ав}}{R_{ав}} = \text{const},$$

$$U_{ac} = I_{ав} \cdot R_{ac} = \frac{U_{ав}}{R_{ав}} \cdot R_{ac} \neq \text{const},$$

так как $R_{ac} \neq \text{const}$

Вольтметр измеряет напряжение между катодом и анодом

Свет электрической дуги



Миллиамперметр измеряет силу тока в цепи анода

Потенциометр позволяет плавно менять напряжение между анодом и катодом от нуля до некоторого максимального значения, примерно равного ЭДС батареи

В течение некоторого промежутка времени в зазоре между шариками вибратора имеется некоторое количество свободных электронов. За счет этого сопротивление воздушного зазора уменьшается, значит, сила тока, возникающего в вибраторе в момент приема волны, увеличивается.

Таким образом, фотоэлектрический эффект состоит в том, что свет, падая на металлическую поверхность (а в металлах много свободных электронов), выбивает из нее электроны. Такой фотоэффект называется внешним, в отличие от внутреннего фотоэффекта, когда электроны выбиваются светом из атомов любых веществ и образуют внутри них некоторую концентрацию свободных носителей электрического заряда.

Поскольку электроны — заряженные частицы, которые под действием электрического поля создают электрический ток, то количественное исследование внешнего фотоэффекта связано с измерением силы тока. Для этого пластину, из которой выбиваются «фотоэлектроны», следует включить в электрическую цепь. Схема такой цепи показана на рисунке.

В баллон, из которого откачивали воздух, помещали два электрода. Один из них (катод) присоединяли к отрицательному полюсу источника тока. На этот электрод в дальнейшем направлялся пучок света через специальное окно, закрытое кварцевым стеклом. (Вы помните, конечно, что кварцевое стекло способно, в отличие от обыкновенного оконного стекла, пропускать ультрафиолетовые лучи.) Другой электрод соединяли через миллиамперметр с ползунком реостата, который включался в цепь по схеме потенциометра. Перемещая ползунок реостата из одного крайнего положения в другое можно плавно менять напряжение между катодом и другим электродом (анодом) от нуля до (примерно) ЭДС источника тока. Напряжение между анодом и катодом измерялось при помощи вольтметра.

Исследование фотоэффекта предполагало проведение нескольких серий опытов. Каждая из них позволяла исследовать свои аспекты данного явления.

Например, можно задать вопрос о том, зависит или нет значение фототока в цепи от напряжения между электродами, и, если зависит, то как (для данного катода при освещении его одним и тем же по составу и интенсивности световым потоком)?

Можно выяснить, зависит ли значение

План исследования:

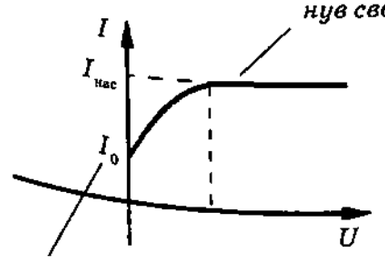
1. $I(U)$ — вид зависимости, физический смысл характерных точек;

2. $I(U)$ при разных значениях светового потока постоянного спектрального состава;

3. $I(U)$ при освещении светом разного спектрального состава;

4. $I(U)$ для разного материала катода.

Начиная с некоторого значения напряжения сила тока в цепи анода перестает изменяться, достигнув своего насыщения



Когда между анодом и катодом электрическое поле отсутствует, сила тока не равна нулю.

При $U = 0$, $I_0 \neq 0$, *следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают кинетической энергией.*

Если за $t = 1$ с *из катода вылетают* N *электронов, то их суммарный заряд составляет:*

$$|q| = |e| N.$$

Тогда сила тока в цепи анода равна:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{|e| N}{1\text{ с}} = |e| N = \text{const} \equiv I_{нас};$$

$$I_{нас} \sim N,$$

сила тока насыщения прямо пропорциональна числу электронов, выбитых светом за 1 с.

фототока от материала катода (при неизменных параметрах электрической цепи) и как. Следует также изучить влияние интенсивности светового потока и его спектрального состава на значение фототока для данного материала катода и при неизменных параметрах электрической цепи.

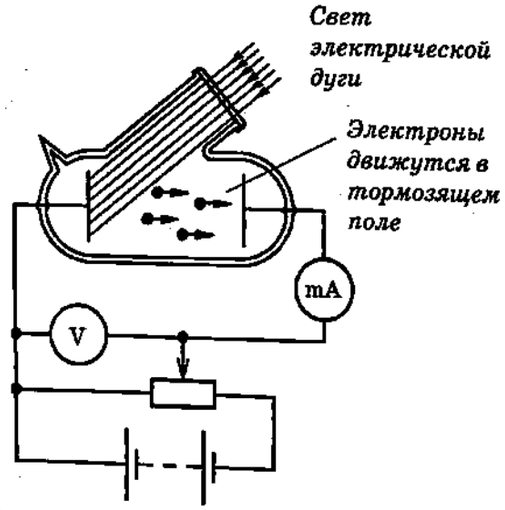
Все эти исследования и были проведены А. Г. Столетовым. Результаты исследования были сформулированы в виде положений, которые сегодня принято называть законами фотоэффекта.

Получим и сформулируем эти законы и мы с вами. Начнем с получения и обсуждения зависимости силы фототока, возникающего в цепи из-за облучения данного катода некоторым световым потоком, от напряжения между анодом и катодом. На рисунке показаны результаты этого исследования в виде графика.

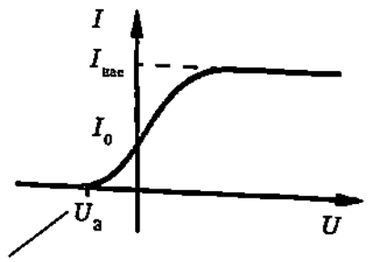
Анализ этой зависимости показывает, что значение силы тока растет вместе с увеличением напряжения до некоторого значения, называемого фототоком насыщения. Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к увеличению силы фототока. Этот факт можно интерпретировать следующим образом. Допустим, что данный световой поток вырывает за 1 с некоторое количество электронов. Все они оказываются вначале вблизи катода. Чтобы создать ток, они должны пройти расстояние между катодом и анодом. Для этого необходимо время, которое зависит от средней скорости движения фотоэлектронов в электрическом поле. Средняя скорость при равноускоренном движении зависит от значения ускорения, а оно, в свою очередь, зависит от значения силы, действующей на электрон, или от напряженности электрического поля, или напряжения между электродами.

Поэтому чем больше напряжение между катодом и анодом, тем больше значение силы тока, пока не наступает момент, когда все выбитые за 1 с электроны за ту же секунду достигают анода. Значение силы тока теперь расти не может принципиально. Следовательно, значение силы тока насыщения имеет простой и наглядный физический смысл. Сила тока насыщения прямо пропорциональна числу выбитых светом за 1 с электронов.

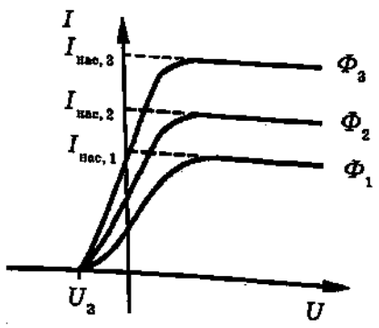
Другой факт, который можно получить, анализируя этот график, состоит в том, что при напряжении между анодом и катодом равном нулю значение фототока



Полярность батареи поменяли на противоположную



При таком значении напряжения сила тока в цепи анода равна нулю



Световой поток, падающий на фотокатод увеличивается, а его спектральный состав остается неизменным:

$$Ф_3 > Ф_2 > Ф_1.$$

Сила тока насыщения (и, следовательно, число электронов выбитых светом за 1 с) увеличивается:

$$I_{нас,3} > I_{нас,2} > I_{нас,1}.$$

Значение запирающего напряжения остается постоянным.

отлично от нуля. Это говорит о том, что даже в отсутствии электрического поля; часть электронов достигают анода, создавая ток в цепи. Это возможно, если допустить, что выбитые светом электроны обладают кинетической энергией.

Чтобы установить значение максимальной энергии фотоэлектронов, выбитым из данного катода данным световым потоком, создадим внутри баллона поле обратного направления. Для этого поменяем полярность батареи и будем плавно менять напряжение между катодом и анодом. Теперь электрическое поле действует на электрон силой, направленной против его скорости. Если на пути «до анода» поле успеет «погасить» скорость электрона, то он не достигнет анода, а вернется назад на катод. Тока в цепи не будет.

Следовательно, напряжение, при котором фототок прекращается — **напряжение запирания** — позволяет рассчитать максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов в этом опыте.

Если цинковую пластину заменить на медную, оловянную, алюминиевую, стальную или какую-либо другую, то вид зависимости не меняется. Однако, значения силы тока насыщения и напряжения запирания зависят при данном световом потоке от рода металла.

Вторая серия опытов состояла в том, чтобы менять интенсивность светового потока (без изменения спектрального состава), падающего на данный катод.

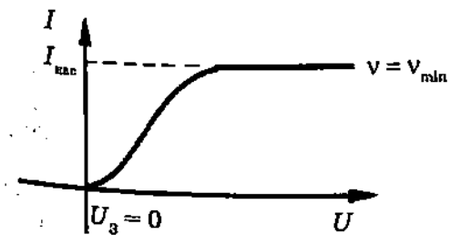
Результаты таких опытов представлены в виде следующего графика. Сразу видно, что сила фототока растет, когда энергия световой волны, падающей на катод увеличивается.

При этом увеличение потока вдвое ведет к пропоциональному росту фототока.

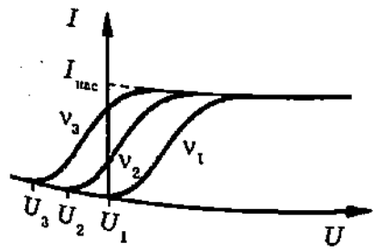
Обратите внимание на следующий факт: все экспериментальные кривые в этих опытах начинаются в одной точке, то есть максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света. Следовательно, можно сформулировать первый закон фотоэффекта.

Количество фотоэлектронов, выбиваемых светом с поверхности металла за одну секунду, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

Но если максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, то от чего же она зависит?



При частоте света $\nu = \nu_{min}$ запирающее напряжение равно нулю: $U_з = 0$.
При частоте света, меньшей минимальной $\nu < \nu_{min}$ фотоэффект отсутствует.



При помощи светофильтров изменяем частоту падающего света:

$$\nu_3 > \nu_2 > \nu_1.$$

При этом изменяется запирающее напряжение:

$$|U_3| > |U_2| > |U_1|.$$

Значение запирающего напряжения увеличивается при увеличении частоты падающего на катод света.

Законы фотоэффекта

1. Количество электронов, выбиваемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально энергии световой волны, поглощаемой за это же время.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растет с частотой света и не зависит от интенсивности света. Для каждого металла существует красная граница фотоэффекта: фотоэффект возникает, если частота света равна или превышает значение минимальной частоты света, постоянной для данного металла.

3. Фотоэффект практически безынерционен.

Чтобы получить ответ на этот вопрос, будем при помощи светофильтров менять спектральный состав света, и снова снимать график зависимости силы фототока от напряжения. В этих опытах обнаруживаются новые закономерности фотоэффекта.

Во-первых, оказывается, что фотоэффект для данного металла имеет место, только когда частота падающего света превышает определенное значение. Его называют «красной границей» фотоэффекта. При увеличении частоты света пропорционально увеличивается напряжение запирания.

То есть собирая все сведения, полученные нами относительно максимальной кинетической энергии фотоэлектронов, можно сформулировать второй закон фотоэффекта: **максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с ростом частоты света и не зависит от интенсивности светового потока.**

Во-вторых, измерение частоты света, при которой начинается фотоэффект у разных металлов, показало, что красная граница фотоэффекта является характеристикой данного вещества. У ряда веществ (щелочные металлы) фотоэффект можно наблюдать при облучении соответствующих пластин видимым светом, у других фотоэффект наблюдается, если освещать их только ультрафиолетовым светом. (Вот почему Герц обнаружил эффект при облучении вибратора именно ультрафиолетовыми лучами.)

Наконец, в своих опытах А. Г. Столетов обнаружил, что фототок в цепи появлялся, как только он включал источник света. То есть **фотоэффект практически безынерционен.** Современные опыты показывают, что запаздывание в появлении фототока составляет не более 10^{-9} с.

Сформулированные выше законы полностью описывают явление фотоэффекта и позволяют находить разные технические применения этого явления. Однако, электродинамика не может дать удовлетворительное объяснение второму закону.

Действительно, с точки зрения волновой теории света энергия фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности световой волны. Ведь чем больше интенсивность света, тем больше сила, действующая на электрон, тем большую энергию он должен приобрести за данное время.

Объяснение законов фотоэффекта потребовало коренного пересмотра взглядов на поглощение света веществом.

§ 23. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА. ФОТОНЫ

А. Эйнштейн (1879 — 1955)

1. Свет — поток частиц (квантов).
2. Квант поглощается электроном целиком. При этом энергия кванта передается этому электрону.
3. $W = h\nu$ — энергия кванта света.

Работа выхода из металла

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2}$$

Энергия кванта

Максимальная кинетическая энергия выбитого электрона

Работа в электрическом поле: $A = qU$,
$[A_{\text{вых}}] =$ эВ;

1 эВ — работа, которую совершает электрическое поле при перемещении электрона между двумя точками, напряжение между которыми равно 1 В.

$1\text{эВ} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Кл} \cdot 1\text{ В} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$

Металл	Химический символ	Работа выхода, эВ
Алюминий	Al	4,1
Железо	Fe	4,5
Кобальт	Co	3,9
Медь	Cu	4,7
Натрий	Na	2,28
Платина	Pt	6,3
Свинец	Pb	4,1
Серебро	Ag	4,7
Цинк	Zn	4,3

Объяснение фотоэффекта впервые было дано А. Эйнштейном, развившем идеи Планка о прерывистом испускании света. Эйнштейн не только воспринял гипотезу о прерывистом испускании света , но и предположил, что в процессах поглощения квант света сохраняет свою индивидуальность (определяемую частотой) и может быть поглощен только целиком и сразу. Тогда каждый акт поглощения кванта света должен сопровождаться выбиванием одного электрона. В этом процессе (и Эйнштейн в этом не сомневался) обязательно должен выполняться фундаментальный закон природы — закон сохранения энергии. Следовательно, энергия кванта целиком передается одному электрону. Часть этой энергии расходуется электроном на «вырывание» из данного металла, а оставшаяся часть — это кинетическая энергия вылетевшего электрона.

Из этого уравнения можно вывести все закономерности фотоэффекта. Мы сделаем это после того, как обсудим физический смысл «работы выхода из металла». Свободный электрон в металле на самом деле вовсе «несвободен». Этот термин означает лишь тот факт, что любой электрон не связан с каким-то конкретным атомом, а точнее ионом металлической кристаллической решетки. Но каждый такой электрон связан с кристаллической решеткой, движется внутри нее. Чтобы вырвать электрон из металла, нужно совершить работу против сил притяжения этой кристаллической решетки. С подобными величинами мы уже сталкивались при изучении удельной теплоты плавления, удельной теплоты парообразования, энергии ионизации атома, удельной энергии связи ядра.

Все это — удельные величины (либо относящиеся к единице массы вещества, либо к данному конкретному атому, либо к одному нуклону данного ядра. В нашем случае работа выхода электрона из любого металла, это характеристика данного металла. Она означает, что электрон, имеющий энергию большую, чем работа выхода, находящийся вблизи поверхности тела и движущийся в сторону этой поверхности, имеет возможность покинуть пределы тела. Таким образом, работу совершает электрон за счет своей энергии, которую он увеличил путем поглощения кванта света.

Уравнение Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2}$$

1. $h\nu < A_{\text{вых}}$, *фотоэффект не происходит;*
2. $h\nu_{\min} = A_{\text{вых}}$;
3. $$\Delta W_{\text{к}} = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = -\frac{m_e v_1^2}{2},$$

так как $\frac{m_e v_2^2}{2} = 0$, *электрон остановлен полем.*

$$\Delta W_{\text{к}} = A_{\text{эл поля}} = eU_{\text{з}};$$

$$eU_{\text{з}} = -\frac{m_e v_1^2}{2};$$

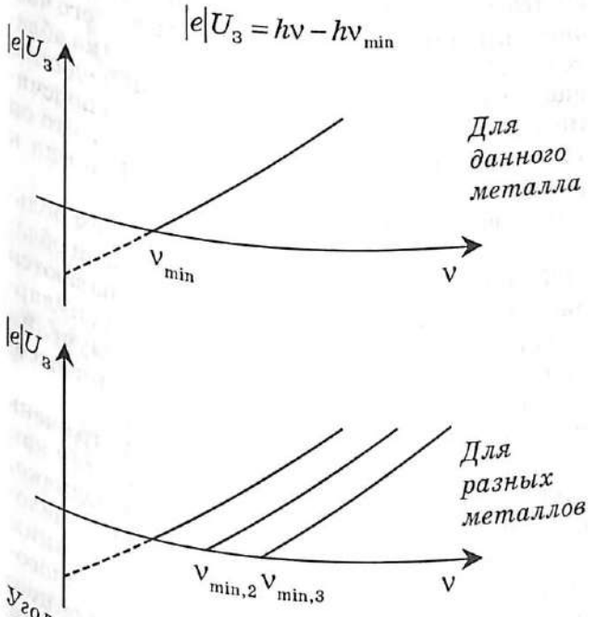
$$-|e|U_{\text{з}} = -\frac{m_e v_1^2}{2};$$

$$|e|U_{\text{з}} = \frac{m_e v_1^2}{2};$$

4. $$h\nu = h\nu_{\min} + |e|U_{\text{з}}$$

Определение постоянной Планка

$$|e|U_{\text{з}} = h\nu - h\nu_{\min}$$



Угол наклона прямых к оси частот одинаков для разных металлов:

$$h = \frac{|e|U_{\text{з}}}{\nu - \nu_{\min}}$$

Теперь нетрудно сообразить, что вылететь за пределы металла может только электрон, поглотивший квант, энергия которого не меньше работы выхода. Эта частота кванта света — минимально возможная, следовательно, она ближе всего к красной части спектра видимого света. Отсюда это название — **красная граница фотоэффекта.**

Очевидно, что работа выхода зависит от рода вещества, отсюда и красная граница — это характеристика данного вещества.

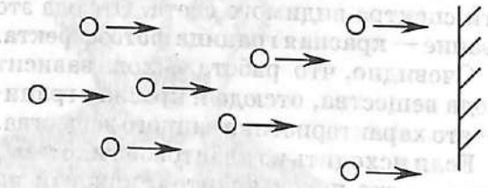
Если исходить из квантовой гипотезы, то свет — это поток квантов, каждый из которых несет вполне определенную энергию. Тогда интенсивность света пропорциональна числу квантов энергии в световом пучке. Именно она и определяет число выбитых светом фотоэлектронов. А вот максимальная энергия фотоэлектрона зависит только от энергии кванта, то есть от частоты падающего света, и работы выхода из данного металла. От интенсивности света она не зависит.

Если записать уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, подставляя вместо работы выхода энергию кванта, соответствующего красной границе фотоэффекта, а вместо кинетической энергии электрона произведение модуля заряда электрона на напряжение запирания, то увидим способ, позволяющий экспериментально определить значение постоянной Планка. Действительно, для этого нужно измерять значения запирающего напряжения при разных частотах падающего на данную пластину света. Если построить график этой зависимости, то получим линию, отсекающую на оси частот $\nu = \nu_{\min}$.

Постоянная Планка численно равна угловому коэффициенту полученной прямой. Если постоянная Планка — универсальная, то есть не зависит от рода вещества, то графики таких зависимостей для разных металлов должны идти параллельно друг другу. Опыт прекрасно подтверждает этот вывод.

Более того, полученное опытным путем при изучении фотоэффекта значение постоянной Планка совпадает в пределах экспериментальной погрешности со значением, полученным Планком в ходе его теоретического расчета совершенно другого явления — теплового излучения. Таким образом, гипотеза о квантах света или прерывистом характере излучения и поглощения света получила превосходное подтверждение в явлении фотоэффекта.

Белый свет — поток фотонов, всевозможных частот из диапазона от $4 \cdot 10^{14}$ Гц до $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц. Монохроматический свет — поток фотонов определенной частоты.



Характеристики фотона:

1. c — *скорость движения фотонов в вакууме;*
2. ν — *частота фотона;*
3. $W = h\nu$ — *энергия фотона данной частоты;*
4. $\lambda = \frac{c}{\nu}$ — *длина волны фотона;*
5. $m = \frac{W}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$ — *масса фотона;*
6. $p = mc = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ — *импульс фотона*

(направление импульса фотона совпадает с направлением его скорости, то есть с направлением распространения светового пучка).

Электрон	Фотон (зеленого цвета)
Частота	
?	$6 \cdot 10^{14}$ Гц
Длина волны	
?	$5 \cdot 10^{-7}$ м
Заряд	
$-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	0
Скорость в вакууме	
$0 < v < c$	$c = 300000$ км/с
Масса	
$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	$4 \cdot 10^{-36}$ кг
Импульс	
при скорости 10^6 м/с $9,1 \cdot 10^{-25}$ (кг м)/с	$1 \cdot 10^{-27}$ (кг м)/с
Энергия	
при скорости 10^6 м/с $4,5 \cdot 10^{-19}$ Дж	$4 \cdot 10^{-19}$ Дж

Порция света — квант — неожиданно оказалась очень похожей на то, что в физике принято называть частицей. Поэтому свойства света, обнаруживаемые при испускании или поглощении, называют корпускулярными. Сама же световая частица получила еще и другое название — фотон.

Проведем сравнение фотона с другими известными нам частицами материи. Главное сходство состоит в том, что фотон обладает энергией и импульсом. Энергия полностью определяется частотой фотона. Эта частица движется в пространстве со скоростью света. В отличие от других частиц, фотон невозможно затормозить или ускорить, как например, электрон или протон. Он «рождается» и «исчезает», имея скорость равную скорости света!

Направление скорости фотона совпадает с направлением светового луча, то есть с направлением переноса энергии световой волной. В дальнейшем, при изучении основ специальной теории относительности мы покажем (см. § 31), что любому объекту, обладающему энергией, можно сопоставить эквивалентную массу. Она равна отношению энергии к квадрату скорости света. Поэтому фотону можно приписать массу, значение которой также зависит от его частоты. Но любая движущаяся частица обладает импульсом. Он равен произведению массы частицы на ее скорость. Если подсчитать импульс фотона, то окажется, что он равен отношению постоянной Планка к длине волны этого фотона.

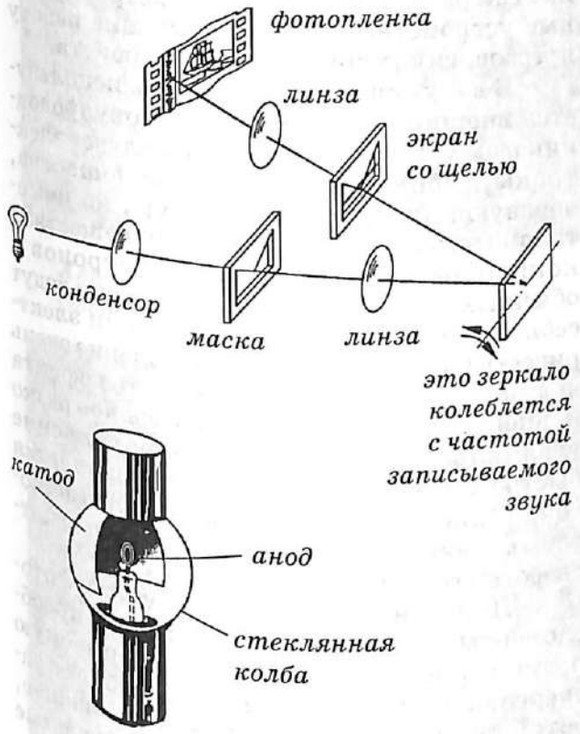
Чем больше частота фотона, тем большей энергией, массой и импульсом он обладает, тем более выраженными оказываются его свойства как частицы. И корпускулярные свойства электромагнитного излучения наиболее отчетливо проявляются при высоких частотах.

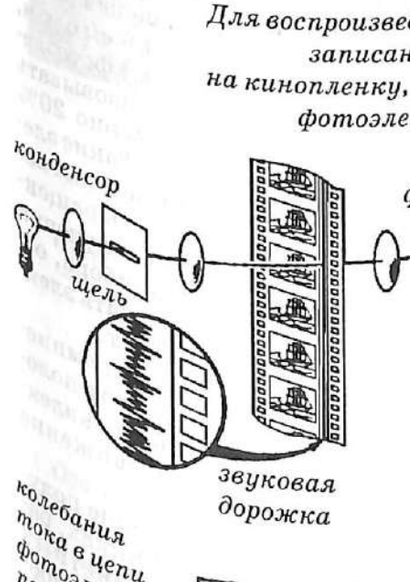
Энергия фотонов видимого света очень мала, она имеет порядок 10^{-19} Дж, так как постоянная Планка весьма мала. Однако, как показали опыты С. И. Вавилова, человеческий глаз является настолько тонким и чувствительным «прибором», что способен реагировать на различие в освещенности поверхности, определяемое единичными квантами.

Фотоэффект — не единственное явление, в котором так ярко проявляются квантовые свойства света. Другим таким явлением оказалось рассеяние рентгеновских лучей на электронах различных веществ.

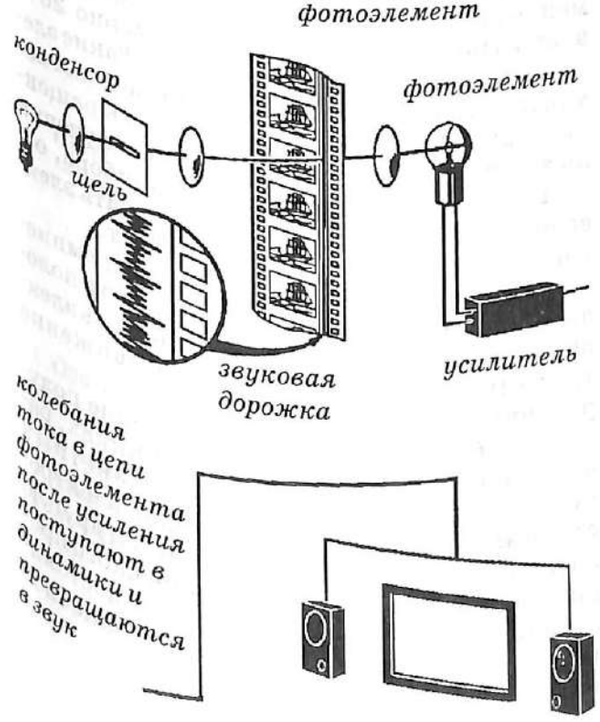
§ 24. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

Схема устройства, записывающего на кинопленку звуковую дорожку





Для воспроизведения звука, записанного на кинопленку, используют фотоэлемент

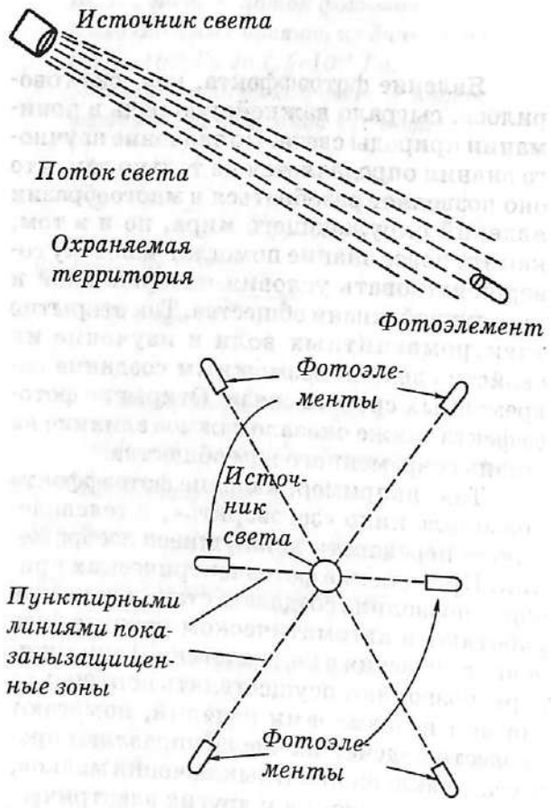


Явление фотоэффекта, как уже говорилось, сыграло важнейшую роль в понимании природы света. Но значение научного знания определяется не только тем, что оно позволяет разобраться в многообразии явлений окружающего мира, но и в том, как это новое знание помогает человеку совершенствовать условия материальной и культурной жизни общества. Так открытие электромагнитных волн и изучение их свойств сделало возможным создание современных средств связи. Открытие фотоэффекта также оказало важное влияние на жизнь современного нам общества.

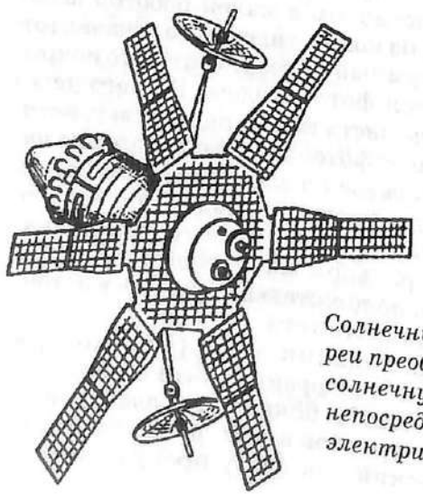
Так, например, явление фотоэффекта позволило кино «заговорить», а телевидению — передавать движущиеся изображения. Применение фотоэлектрических приборов позволило создавать станки, которые работают в автоматическом режиме безо всякого участия в нем человека. Такие приборы позволяют осуществлять контроль за формой и размерами изделий, помогают провести подсчет их числа, управляют процессами включения и выключения маяков, уличного освещения и других электрических цепей. Наконец, фотоэлектрические приборы позволют преобразовывать энергию Солнца непосредственно в электрическую энергию. Таким образом, практически любое высокотехнологическое производство использует фотоэлементы — устройства, в основе работы которых лежит явление фотоэффекта.

Современный вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта металлом с малой работой выхода. Воздух из колбы тщательно откачан (отсюда: вакуумный фотоэлемент). Это покрытие является фотокатодом. На него через прозрачную часть колбы падает свет, который выбивает фотоэлектроны, которые начинают двигаться в электрическом поле к другому электроду — аноду. Обычно это проволочная петля или диск, установленные в центральной части колбы и присоединенные к положительному полюсу источника постоянного тока.

При попадании света (видимого, а иногда даже и инфракрасного) на фотокатод внутри колбы появляются электроны, которые создают ток в электрической цепи. Электрический ток сразу прекращается,



Фотоэлемент можно использовать в качестве стимулятора корневой системы растений



Солнечные батареи преобразуют солнечную энергию непосредственно в электрическую

как только свет пропадает. Таким образом, фотоэлемент в комбинации с электромагнитным реле позволяет управлять работой различных электрических цепей, практически мгновенно включая или размыкая их. Так работают автоматы в метро, охранные устройства, контролирующие работу прессов, гильотин и прочих устройств.

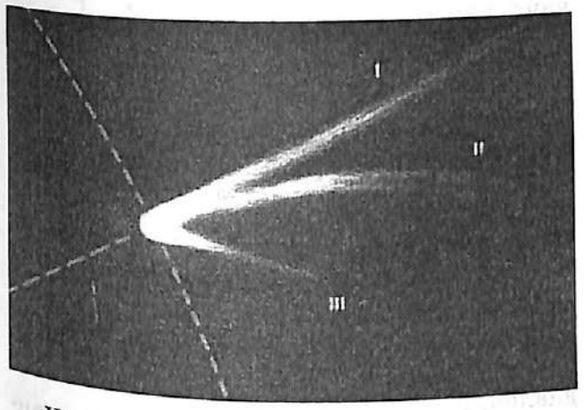
В вакуумном фотоэлементе используется внешний фотоэффект. В полупроводниковом — внутренний. В этом случае электроны выбиваются из атомов вещества, образующих кристаллическую, но неметаллическую решетку. В таких веществах концентрация свободных электронов в обычных условиях так мала, что они ведут себя как изоляторы, непроводники электричества. Их удельное сопротивление очень велико. Из-за внутреннего фотоэффекта концентрация свободных электронов резко увеличивается, удельное сопротивление быстро уменьшается и в цепи появляется ток. Такие устройства, сопротивление которых зависит от освещенности, называются фоторезисторами.

Широкое применение получили фотоэлементы, которые непосредственно преобразуют энергию света в электрическую энергию. Мы познакомимся подробнее с работой таких солнечных батарей позднее, когда будем изучать вещества, называемые полупроводниками. А сейчас скажем о том, что в настоящее время существуют фотоэлементы, которые способны преобразовывать в электрическую энергию примерно 20% энергии падающего на них света. Такие элементы представляют собой тонкие пластинки, вырезанные из специально выращенных кристаллов кремния. Поток излучения на 1 м² площади поверхности прибора, освещенного солнцем, способен создать электрическую мощность до сотни ватт.

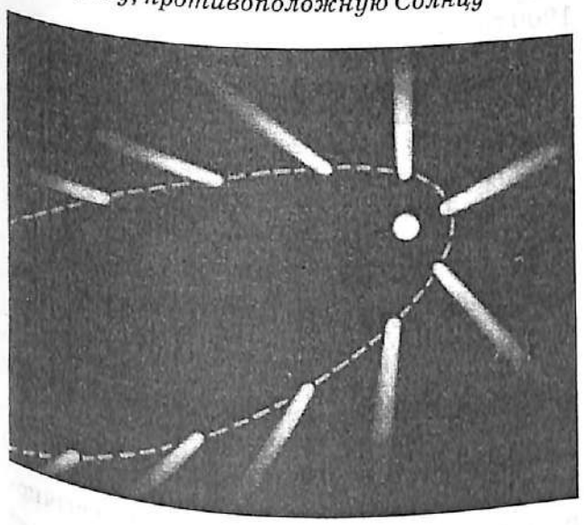
В солнечный день батареи кремниевых фотоэлементов площадью всего в половину газетной страницы могут питать электродвигатели, приводящие в движение различные устройства.

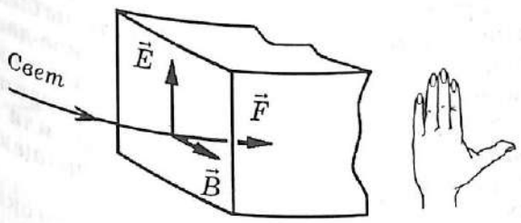
Особенно широкое применение получили солнечные батареи на спутниках, ракетах, автоматических межпланетных станциях, где они обеспечивают электроэнергией бортовые радиостанции и другую аппаратуру. В условиях космического пространства такие батареи работают постоянно, ведь на них все время падает солнечное излучение.

§ 25. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА



Хвост кометы всегда направлен в сторону, противоположную Солнцу





Давление

1. Обозначение: p.
2. Формула-определение: $p = \frac{F}{S}$
3. Единица давления: *Па*.
4. Физический смысл: *давление численно равно силе, действующей по нормали к поверхности на единицу ее площади (1 м²).*

Мы знаем, что свет поглощается веществом и передает ему свою энергию. Но оказывает ли свет на тело механическое воздействие?

Еще в давние времена неоднократно высказывались предположения о существовании светового давления. В 1604 году немецкий астроном И. Кеплер объяснил форму хвоста кометы влиянием светового давления. Однако теоретическое обоснование этого феномена было сделано почти 250 лет спустя.

Д. К. Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет, падая на поверхность любого тела, должен оказывать на него давление.

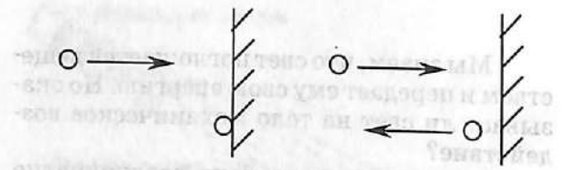
Это явление, названное **световым давлением**, происходит из-за того, что электромагнитное поле световой волны приводит электроны, имеющиеся внутри любого вещества, в колебательное движение. Это движение происходит в магнитном поле волны, а значит, на каждый электрон действует сила Лоренца.

Поскольку все электроны совершают «упорядоченное» движение, то в любой момент времени действующая на них сила Лоренца имеет одно и то же направление. На рисунке показано направление этой силы, а вы сами, применяя правило левой руки, можете проверить этот факт: сила, действующая на все электроны направлена в сторону распространения волны по нормали к поверхности тела. То есть в данном случае сила Лоренца играет роль силы давления. Отнесенная к площади поверхности, она даст значение давления, которое оказывает свет на данную поверхность.

Появление квантовой теории света позволило объяснить феномен светового давления иначе. Фотоны, падающие на поверхность тела, могут отражаться данной поверхностью или поглощаться ею. Но в любом случае они, обладая импульсом, передают этой поверхности весь свой импульс или часть своего импульса.

Из-за этого покоящееся свободное тело, на которое падает свет, может прийти в движение, следовательно, его импульс изменится.

Но изменение импульса тела означает, что на него действует сила. (Вспомните второй закон Ньютона в импульсной форме.) Направление этой силы, как нетрудно со-



$S = 1\ м^2$

$n = \frac{N}{t}$ – *число фотонов, падающих на поверхность за 1 с.*

$p_1 = \frac{h}{\lambda}$

$\Delta p_{пов} = p_1 \cdot N - 0 = \frac{h}{\lambda} \cdot N;$

$F_\perp = \frac{\Delta p_{пов}}{t} = \frac{h \cdot N}{\lambda t} = \frac{h \cdot n}{\lambda}.$

$S = 1\ м^2$

$n = \frac{N}{t}$ – *число фотонов, падающих на поверхность за 1 с.*

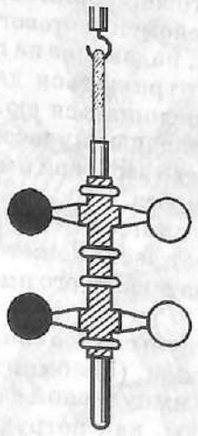
$p_{1,0} = \frac{h}{\lambda}; \quad p_{1,к} = -\frac{h}{\lambda};$

$\Delta p_1 = -\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda} = -\frac{2h}{\lambda}$

$\Delta p_{пов} = -\Delta p_1 \cdot N = \frac{2h}{\lambda} \cdot N;$

$F_\perp = \frac{\Delta p_{пов}}{t} = \frac{2hN}{\lambda t} = \frac{2hn}{\lambda}.$

П. Н. Лебедев (1866 — 1912)



Фрагмент устройства П. Н. Лебедева для измерения светового давления

образить, совпадает с направлением первоначального движения фотонов.

Таким образом, и волновая, и квантовая теория света могут объяснить явление светового давления, а количественные расчеты позволяют оценить значение светового давления. Теоретические оценки показывают, что в яркий солнечный день на поверхность площадью 1 м² действует сила примерно равная $4 \cdot 10^{-6}$ Н.

Для подтверждения справедливости как волновых, так и квантовых представлений о свете необходимо было провести экспериментальное измерение светового давления.

Впервые это удалось сделать знаменитому русскому физику П. Н. Лебедеву в 1900 году.

Прибор П. Н. Лебедева состоял из легкого стерженька, подвешенного на тонкой стеклянной нити. По краям стерженька были приклеены тонкие металлические крылышки. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька, поэтому световое давление создавало силу, приводящую к повороту системы и закручиванию стеклянной нити.

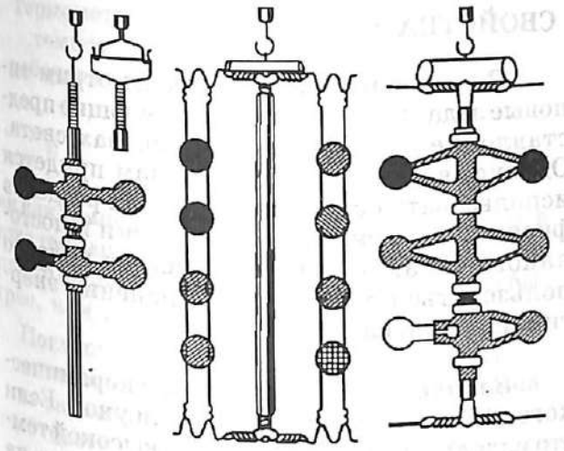
Вся система помещалась в большой сосуд, из которого тщательно откачивался воздух, чтобы конвективные потоки, возникающие из-за поглощения света, не влияли на движение крылышек.

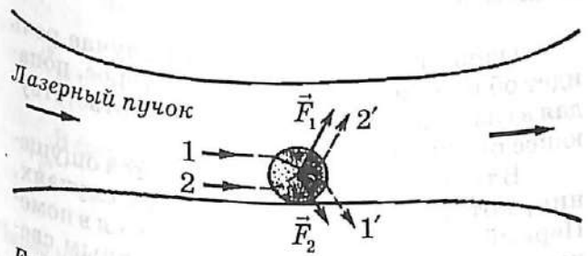
По углу закручивания нити, можно было рассчитать силу давления света. Зная площадь крылышек, П. Н. Лебедев вычислил световое давление.

Трудность в проведении этого опыта состояла в том, что масса всей системы была столь мала, что даже незначительное движение оставшегося в сосуде воздуха, возникающее из-за неравномерного нагревания крылышек и стенок сосуда, приводили к возникновению дополнительных вращающих моментов.

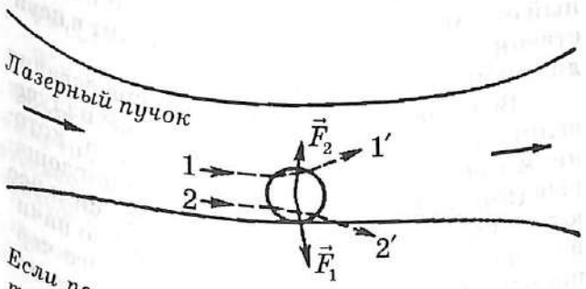
Кроме того, на закручивание нити оказывает влияние различное нагревание разных сторон крылышек. Та сторона, на которую падает свет, нагревается сильнее, чем противоположная. Из-за этого молекулы воздуха, которые при движении сталкиваются с освещенной стороной крылышек, передают крылышкам больший импульс, чем молекулы, сталкивающиеся с менее нагретой поверхностью.

Однако, не смотря на сравнительно низкий уровень тогдашней экспериментальной техники, П. Н. Лебедеву удалось все эти трудности преодолеть, взяв очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. Световое давление было измерено.





Если показатель преломления вещества частицы больше показателя преломления окружающей среды, то результирующая сил светового давления, действующая в лазерном пучке на частицу, находящуюся на краю пучка, направлена к центру пучка. Частица втягивается в пучок.



Если показатель преломления вещества частицы меньше показателя преломления окружающей среды, то результирующая сил светового давления, действующая в лазерном пучке на частицу, находящуюся на краю пучка, направлена от центра пучка. Частица выталкивается из пучка.

Такой способ разделения является очень удобным для разделения биологических объектов (вирусов, макромолекул, клеток), находящихся в жидкости. Кроме всего прочего, он не приводит к чрезмерному нагреванию разделяемых объектов.

Измеренное в этих опытах значение светового давления совпало в пределах экспериментальных погрешностей с тем значением, которое было получено Максвеллом в его теоретических расчетах.

Примерно через три года после первого измерения, П. Н. Лебедев провел еще более тонкий эксперимент по измерению давления света на газы.

До сих пор опыты П. Н. Лебедева считаются вершиной экспериментальной физики. Английский физик Томсон, познакомившись с опытами Лебедева писал: «Я всю свою жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его световое давление, и вот опыты Лебедева заставили меня сдаться». Эти опыты полностью подтвердили гипотезу о существовании импульса у фотонов.

Хотя в обычных условиях световое давление очень мало, его действие может тем не менее оказаться весьма существенным. Можно в качестве иллюстрации привести поучительный случай, который произошел с американским спутником «Эхо».

После выхода этого спутника на орбиту сжатым газом был наполнен большой полиэтиленовый шар. Его диаметр составлял около 30 м. Наблюдения за движением спутника привели к неожиданным результатам. За время одного оборота вокруг Земли шар под действием светового давления сместился с расчетной орбиты примерно на 5 м. В результате вместо ожидаемого времени пребывания на орбите (его оценивали примерно в 20 лет) спутник продержался на орбите меньше года.

Световое давление играет весьма значительную роль в космическом пространстве, где отсутствуют силы сопротивления движению. Неслучайно, ученые всерьез разрабатывают проекты космических парусников, тяга которых создается исключительно за счет светового давления. Силы светового давления, наряду с силами тяготения, играют весьма существенную роль во внутризвездных процессах. Там при температурах в несколько десятков миллионов градусов давление электромагнитного излучения по теоретическим оценкам должно достигать огромных значений. Они способны уравновесить весьма значительные силы тяготения, сжимающие звезду.

§ 26. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

Интенсивность теплового излучения зависит:

1. От температуры тела;
2. От площади излучающей поверхности;
3. От цвета поверхности.

Спектральный состав теплового излучения зависит:

1. От температуры тела;
2. От агрегатного состояния тела;
3. От рода вещества

Качественные задачи

Первый случай:
1. Обычная комнатная температура.
2. На вазу падает белый свет.

Белый свет полностью поглощается этими частями вазы. Они — черные.

Белый свет полностью отражается этими частями вазы. Они — белые.

Собственное тепловое излучение вазы лежит в инфракрасном диапазоне. Мы видим только свет, отраженный от нее. В этом случае главное явление — поглощение света.

Второй случай:
1. Температура высока, так что ваза испускает свет в видимом диапазоне.
2. Ее собственное тепловое излучение по интенсивности больше падающего извне.

Эти участки вазы испускают свет слабее, поэтому кажутся темными на более светлом фоне участков, излучающих сильнее.

В этом случае главное явление — испускание света.

В этом параграфе мы рассмотрим типовые задачи, в основном, требующие представление о квантовых свойствах света. Однако, во многих случаях нам придется использовать сведения из других разделов физики, в частности из механики и постоянного тока. И, конечно, всегда полезно пользоваться законами сохранения энергии и импульса.

Задача 1. На светлом фоне керамического изделия сделан темный рисунок. Если это изделие поместить в печь с высокой температурой, то виден светлый рисунок на темном фоне. Почему?

Очевидно, что в данном случае речь идет об излучении изделия, которое, попадая в глаза человека, вызывает соответствующее ощущение.

В тексте задачи сравниваются ощущения, которые возникают в двух случаях. Первый — когда изделие находится в помещении и освещается белым дневным светом. Другой случай — когда изделие находится в печи. Эти два случая и следует рассмотреть сначала в отдельности, а затем провести сравнение и дать ответ на вопрос задачи.

В первом случае зрительное ощущение дает только белый дневной свет, отраженный от изделия или поглощенный им. Собственное тепловое излучение лежит в невидимой части спектра.

Во втором случае температура изделия велика и ее собственным тепловым излучением пренебрегать нельзя. Но тела, которые (при прочих равных) лучше поглощают падающее на них излучение, сильнее излучают. Поэтому, когда тело само начинает излучать, сильнее излучают его черные части. Поэтому в испускаемом свете черные участки будут казаться более светлыми, а светлые (на их фоне) будут казаться темными.

Таким образом, причина описанного «обращения» света глазом связана с тем, что процессы поглощения и испускания света (и теплового излучения) происходят одинаково: те части, которые хорошо поглощают, так же хорошо излучают, но между этими процессами отсутствует равновесие. А зрительное ощущение всегда оценивает интенсивность излучения, попадающего в глаза.

Термометр 1	Термометр 2
темное рабочее тело	светлое рабочее тело

В момент $t = 0$

t°_{01} $\qquad$ t°_{02}

$$t^\circ_{01} = t^\circ_{02}.$$

Так как температура рабочего тела термометров ниже температуры окружающей среды (на солнце), то процесс поглощения излучения идет быстрее, чем процесс испускания.

Поглощает интенсивно из-за темного цвета рабочего тела	Поглощает не столь интенсивно из-за светлого цвета рабочего тела

Через малый промежуток времени

t°_{11} $\qquad$ t°_{12}

$$t^\circ_{11} > t^\circ_{12}.$$

В состоянии теплового равновесия

$t^\circ_{к1}$ $\qquad$ $t^\circ_{к2}$

$$t^\circ_{к1} = t^\circ_{к2}$$

Через некоторый промежуток времени показания термометров станут равными и будут оставаться такими сколь угодно долго, пока внешние условия не изменяться.

1. Энергия фотона равна: $W = h\nu$, то есть определяется его частотой.

$\nu = \text{const}$, $h = \text{const}$, следовательно, $W = \text{const}$.

2. Фотон — неделимая частица, поэтому он не может «потерять» часть своей энергии. Следовательно, энергия фотона не меняется при переходе из одной среды в другую.

3. Фотон характеризуется следующими величинами:

$$m_{\text{в вакууме}} = \frac{W}{c^2} \qquad m_{\text{в среде}} = \frac{W}{v^2}$$

$c > v$,

$$m_{\text{в вакууме}} < m_{\text{в среде}}.$$

$$\lambda_{\text{в вакууме}} = \frac{c}{\nu} \qquad \lambda_{\text{в среде}} = \frac{v}{\nu}$$

$$\lambda_{\text{в вакууме}} > \lambda_{\text{в среде}}.$$

$$p_{\text{в вакууме}} = \frac{h}{\lambda_{\text{в вакууме}}} \qquad p_{\text{в среде}} = \frac{h}{\lambda_{\text{в среде}}}$$

$$p_{\text{в вакууме}} < p_{\text{в среде}}$$

Задача 2. Два одинаковых спиртовых термометра отличаются только цветом окраски спирта. Будут ли термометры показывать одинаковую температуру, если их выставить на солнце?

Для ответа на поставленный вопрос нужно точно знать, что показывает термометр. Верно, — температуру собственного рабочего тела (в данном случае, спирта), находящегося в тепловом равновесии с окружающими телами. Это означает, что в состоянии теплового равновесия резервуар со спиртом поглощает извне и испускает во внешнюю среду за 1 с одинаковое количество излучения (светового и теплового).

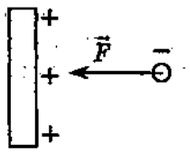
Именно поэтому оба термометра, спустя некоторый промежуток времени, будут показывать одинаковую температуру. Но приходить в состояние теплового равновесия они будут в течение разного времени: неокрашенный спирт — медленнее, чем окрашенный. Поэтому в течение небольшого промежутка времени показания термометров будут различаться. (Но говорить о температуре, пока столбик спирта движется, некорректно, так как температура — характеристика состояния теплового равновесия и только в этом случае имеет смысл.)

Задача 3. Изменяется ли энергия фотона при переходе из одной среды в другую? А что изменяется?

Чтобы ответить на первый вопрос задачи, нужно вспомнить, что фотон ведет себя как неделимая частица: он может поглощаться только целиком. Поэтому при переходе из одной среды в другую часть своей энергии он «потерять» или «приобрести» от других тел не может. Следовательно, энергия фотона не изменится в этой ситуации.

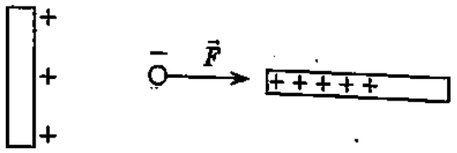
Ответ на этот вопрос можно дать также, исходя из факта, что при переходе из одной среды в другую частота света, и, следовательно, и частота фотонов, не меняется. А так как энергия фотона целиком определяется его частотой, то она не меняется при переходе из одной среды в другую.

Ответ на второй вопрос можно дать, если сообразить, что скорость света (и фотонов) меняется при переходе в другую среду. Следовательно, будут меняться те характеристики частицы, которые связаны со скоростью: масса, импульс и длина волны.

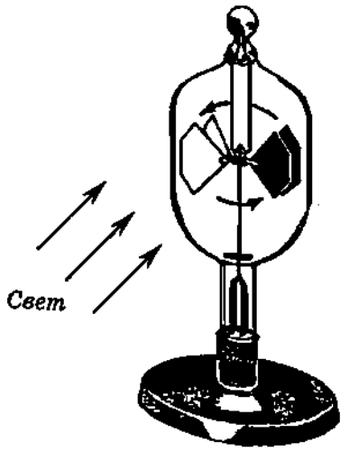


Электроны, вылетевшие из пластины вследствие фотоэффекта, находятся в электрическом поле положительно заряженной пластины. Следовательно, возвращаются полем назад.

Положительный заряд пластины невелик.



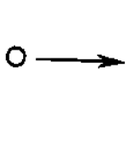
Если зарядить положительным зарядом стеклянную палочку, то по принципу суперпозиции напряженность результирующего поля может быть направлена к палочке, от пластины. В таком случае положительный заряд пластины все время увеличивается при ее освещении светом дуги и может стать довольно большим.



1. Свет падает на зачерненную поверхность.

$S = 1\ м^2$

$n = \frac{N}{t}$ — число фотонов, падающих на поверхность за 1 с.



$p_1 = \frac{h}{\lambda}$ — импульс фотона

$\Delta p_{пов} = p_1 \cdot N - 0 = \frac{h}{\lambda} \cdot N;$

$F_1 = \frac{\Delta p_{пов}}{t} = \frac{h \cdot N}{\lambda t} = \frac{h \cdot n}{\lambda}.$

Задача 4. Как зарядить цинковую пластинку, закрепленную на стержне электрометра, положительным зарядом, имея электрическую дугу, стеклянную палочку и кусок шелка? Палочкой прикасаться к пластине нельзя.

Думаю, вы сразу догадались, что можно в данном случае воспользоваться фотоэффектом, ведь свет дуги вырывает с поверхности цинка электроны. Пластина, теряя электроны, приобретает положительный заряд. Для чего же тогда стеклянная палочка с шелком?

Поле положительно заряженной пластины «возвращает» электроны назад, ведь в среднем, скорость их после вылета из пластины не слишком велики. Поэтому скоро наступает равновесие: сколько электронов покидает пластину, примерно столько же возвращается на нее за 1 с.

Чтобы сделать заряд пластины довольно большим, нужно «помешать» электронам возвращаться на нее. Для этого зарядим стеклянную палочку и «соберем» на нее вылетающие из пластины электроны. Повторяя процедуру несколько раз, можно сообщить пластине доволь большой положительный заряд.

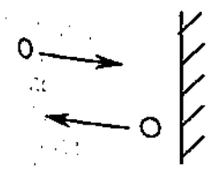
Задача 5. Легкая крестовина с четырьмя лепестками свободно вращается вокруг вертикальной оси внутри стеклянного сосуда, из которого откачан воздух. Поверхность каждого лепестка с одной стороны зеркальная, а с другой — черная. Если на сосуд направить свет, то крестовина начинает вращаться. При этом зеркальная поверхность движется навстречу лучам света, а черная — по направлению лучей. Можно ли этот опыт объяснить световым давлением?

Свет — поток фотонов, обладающих импульсом. При взаимодействии фотона и крылышка происходит изменение импульса фотона и импульса крылышка, но так, что закон сохранения импульса выполняется: изменение импульса фотонов равно изменению импульса крылышек, взятому с противоположным знаком.

Зачерненная поверхность поглощает фотон. Следовательно, изменение импульса фотона равно по значению начальному импульсу, а всех фотонов — произведению импульса фотона на число фотонов.

От зеркальной поверхности фотоны

2. Свет падает на зеркальную поверхность.



$p_{1,0} = \frac{h}{\lambda}; \quad p_{1,к} = -\frac{h}{\lambda};$

$\Delta p_1 = -\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda} = -\frac{2h}{\lambda}$

$\Delta p_{пов} = -\Delta p_1 \cdot N = \frac{2h}{\lambda} \cdot N;$

$F_1 = \frac{\Delta p_{пов}}{t} = \frac{2hN}{\lambda t} = \frac{2hn}{\lambda}.$

Расчетные задачи

Дано:

$\lambda = 600$ нм

$P = 1{,}7 \cdot 10^{-17}$ Вт

$t = 1$ с

n — ?

СИ:

$6 \cdot 10^{-7}$ м

Решение:

1. Допустим, что за t с на сетчатку глаза падает N фотонов, тогда:

$W_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$

$W = NW_1 = N\frac{hc}{\lambda}$ — энергия, поступающая на сетчатку за t с.

2. Тогда мощность излучения составит:

$P = \frac{W}{t} = N\frac{hc}{\lambda t} = \frac{N}{t} \cdot \frac{hc}{\lambda} = n \cdot \frac{hc}{\lambda}.$

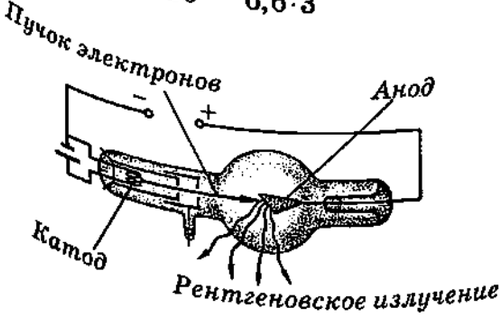
3. Выразим из полученной формулы неизвестную величину n:

$n = \frac{P\lambda}{hc};$

$[n] = \left[\frac{P\lambda}{hc}\right] = \frac{Вт \cdot м \cdot с}{Дж \cdot с \cdot м} = \frac{1}{с}.$

4. Проведем вычисления:

$n = \frac{1{,}7 \cdot 10^{-17} \cdot 6 \cdot 10^{-7}}{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = \frac{1{,}7 \cdot 6}{6{,}6 \cdot 3} \cdot 10^{-17-7+34-8} \approx 50\left(\frac{1}{с}\right)$



отражаются. Изменение их импульса равно удвоенному начальному импульсу.

Значит, зеркальной поверхности передается вдвое больший импульс, чем зачерненной.

В случае светового давления зеркальная сторона должна двигаться в направлении светового луча, а черная — навстречу световым лучам.

В опыте наблюдается обратная картина, следовательно, наблюдаемый эффект не связан с феноменом светового давления.

Задача 6. Пороговая чувствительность сетчатки человеческого глаза к желтому свету, длина волны которого равна 600 нм, составляет $1{,}7 \cdot 10^{-17}$ Вт. Сколько фотонов ежесекундно попадает при этом на сетчатку глаза?

Каждый фотон приносит на сетчатку энергию, которая определяется его частотой (или длиной волны).

Так как энергия — величина аддитивная, то полная энергия, принесенная на сетчатку всеми фотонами, равна произведению энергии одного фотона и числа фотонов, которые поглотила сетчатка глаза за некоторое время.

Энергия, отнесенная ко времени, в течение которого она поступала в глаз наблюдателя, равна мощности излучения. Пороговая чувствительность сетчатки, то есть минимальная мощность, воспринимаемая глазом, нам известна.

Таким образом, выражая из формулы для расчета мощности искомую величину — число фотонов, падающих на сетчатку за 1 с, получим выражение для расчета.

Проверка наименования дает «обратную секунду». Это верно, ведь мы находим число частиц (безразмерная величина) в единицу времени.

Расчет показывает, что человеческий глаз способен получать зрительное ощущение, когда на его сетчатку за 1 с падает около 50 фотонов.

Задача 7. Рентгеновская трубка, работающая при напряжении 50 кВ и токе 2 мА, излучает $5 \cdot 10^{13}$ фотонов в секунду. Принимая среднюю длину волны излучения трубки равной 0,1 нм, определите КПД трубки. Объясните, на что расходуется остальная энергия, поглощаемая из электросети.

Дано:

$U = 50$ кВ
$I = 2$ мА
$\lambda = 0{,}1$ нм
$n = 5 \cdot 10^{13}\ с^{-1}$
η — ?

СИ:

$5 \cdot 10^4$ В
$2 \cdot 10^{-3}$ А
$1 \cdot 10^{-10}$ м

Решение:

1. $\eta = \frac{P_{полезн}}{P_{затрач}} \cdot 100\%$;

$P_{полезн}$ — мощность рентгеновского излучения;

$P_{затрач}$ — мощность, потребленная из сети.

2. $P_{полезн} = nW_1 = nh\nu = \frac{nhc}{\lambda}$;

$P_{затрач} = UI$.

3. $\eta = \frac{nhc}{\lambda UI} \cdot 100\%$

$[\eta] = \left[\frac{nhc}{\lambda UI}\right] = \frac{с^{-1} \cdot Дж \cdot с \cdot м \cdot с^{-1}}{м \cdot В \cdot А} = 1$

4. Выполним расчеты:

$$\eta = \frac{5 \cdot 10^{13} \cdot 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-10} \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% =$$

$$= 3{,}3 \cdot 3 \cdot 10^{13-34+8+10-4+3} \cdot 100\% = 0{,}1\%$$

Дано:

$A_{вых} = 4{,}5$ эВ
ν_{min} — ?

СИ:

$4{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Решение:

1. По определению красной границы:

$$A_{вых} = h\nu_{min};$$

$$\nu_{min} = \frac{A_{вых}}{h}.$$

2. Выполним расчеты:

$$\nu_{min} = \frac{4{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Дж}{6{,}6 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с} = 1{,}1 \cdot 10^{15}\ Гц.$$

3. Диапазон частот видимого света:

$4{,}0 \cdot 10^{14}\ Гц \le \nu_{видим} \le 7{,}5 \cdot 10^{14}\ Гц$,

фотоэффект не происходит, т.к. $\nu_{видим} < \nu_{min}$.

Дано:

электрон
$A_{вых} = 4{,}5$ эВ
$\lambda = 220$ нм
W_{max} — ?
υ_{max} — ?

СИ:

$4{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж
$2{,}2 \cdot 10^{-7}$ м

Табличные:

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-17}$ кг

Рентгеновское излучение, как вы помните, возникает при резком торможении электронов, движущихся с очень большой скоростью. Рентгеновское излучение состоит из фотонов, частота которых значительно выше частоты видимого излучения.

Энергию одного фотона излучения подсчитаем по его средней длине волны.

Теперь можно вычислить мощность потока рентгеновского излучения, умножая энергию одного фотона на число фотонов, излучаемых за 1 с.

Остается подсчитать мощность, потребляемую трубкой из электрической сети. Мощность в этом случае равна произведению напряжения на трубке и силы тока в ней.

Рентгеновская трубка служит для создания рентгеновских лучей, следовательно, мощность рентгеновского излучения — полезная мощность. Находя отношение ее к мощности, потребляемой трубкой от сети, получим КПД трубки.

Обратите внимание, что КПД рентгеновской трубки очень невелик — всего десятая доля процента!

Остальная энергия выделяется в аноде трубки виде тепла.

Задача 8. Работа выхода электронов из ртути равна 4, 5 эВ. Возникнет ли фотоэффект, если на поверхность ртути направить видимый свет?

Фотоэффект возникает, если частота падающего света выше минимальной для ртути (красная граница фотоэффекта).

Следовательно, нужно рассчитать минимальную частоту света по работе выхода электронов из ртути.

Теперь необходимо записать интервал частот видимого диапазона и провести сравнение значений из этого диапазона с минимальной частотой света для ртути.

Частота видимого света меньше минимальной частоты, вызывающей фотоэффект в ртути. Следовательно, фотоэффект не происходит.

Задача 9. На поверхность вольфрама падает излучение с длиной волны 220 нм. Определить максимальную энергию и максимальную скорость фотоэлектронов, если работа выхода из вольфрама составляет 4,5 эВ.

Решение:

1. Выразим максимальную кинетическую энергию фотоэлектрона из уравнения для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{вых} + W_{max};$$

$$W_{max} = \frac{hc}{\lambda} - A_{вых}.$$

2. Найдем максимальную скорость фотоэлектрона по его кинетической энергии:

$$W_{max} = \frac{m_e \upsilon_{max}^2}{2}; \qquad \upsilon_{max}^2 = \frac{2W_{max}}{m_e};$$

$$\upsilon_{max} = \sqrt{\frac{2W_{max}}{m_e}}.$$

3. Проведем вычисления:

$$W_{max} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2{,}2 \cdot 10^{-7}} - 4{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} =$$

$$= 9 \cdot 10^{-19} - 7{,}2 \cdot 10^{-19} = 1{,}8 \cdot 10^{-19}\ (Дж);$$

$$\upsilon_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-19}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}}} = \sqrt{0{,}39 \cdot 10^{12}} = 0{,}63 \cdot 10^6 \left(\frac{м}{с}\right).$$

Ответ: максимальная энергия фотоэлектрона $W_{max} = 1{,}8 \cdot 10^{-19}$ Дж, а максимальная скорость $\upsilon_{max} = 0{,}63 \cdot 10^6$ м/с = 630 км/с.

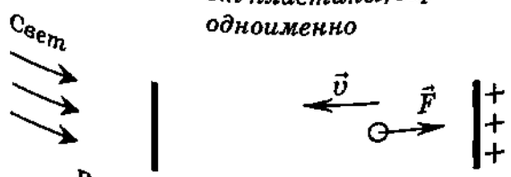
Дано:

цинк
$A_{вых} = 3{,}7$ эВ
$\lambda = 324$ нм
φ_{max} — ?

СИ:

$3{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж
$3{,}24 \cdot 10^{-7}$ м

Вылетевший из пластины электрон отталкивается от пластины, заряженной одноименно



Вылетевший из пластины электрон возвращается на пластину, заряженную зарядом противоположного знака

Решение этой задачи не должно вызвать у вас затруднений, так как требует применения уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и знания формулы кинетической энергии.

Как мы это уже неоднократно делали, выразим частоту фотонов через их длину волны и скорость света. Тогда получим уравнение, из которого сразу можно найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

Зная максимальную кинетическую энергию, выразим сначала квадрат максимальной скорости электронов, а затем, извлекая квадратный корень, найдем значение их максимальной скорости.

При проведении вычислений нужно обратить внимание на действия со степенями. Удобно все слагаемые записывать так, чтобы порядок величины, определяемый степенью числа 10, у всех слагаемых был одинаковым.

При извлечении квадратного корня помните о равной точности вычислений.

Обратите внимание на значение скорости фотоэлектрона: при энергии примерно в 1 эВ оно огромно и составляет сотни километров в секунду.

Задача 10. В опыте Столетова цинковая пластинка, заряженная отрицательно, облучалась светом вольтовой дуги. До какого максимального потенциала зарядится цинковая пластинка, если она будет облучаться монохроматическим светом с длиной волны 324 нм? Работа выхода из цинка равна 3,7 эВ.

Сначала выясним, о каком минимальном потенциале пластинки идет речь. Сначала пластинка была заряжена отрицательным зарядом. Он определял потенциал пластинки по отношению, например, к земле. При фотоэффекте пластинка теряет отрицательный заряд — светом выбиваются электроны. Поэтому по мере протекания фотоэффекта заряд пластинки уменьшается, и вместе с ним увеличивается ее потенциал по отношению к земле.

Очевидно, пока пластинка имеет отрицательный заряд, фотоэффект происходит, так как поле пластинки «способствует» оттоку вылетевших электронов от пластинки. Когда заряд пластинки становится равным нулю, ее потенциал также становится равным нулю.

Решение:

1. $h\nu = A_{вых} + \frac{m_e v_{max}^2}{2}$;

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{вых} + \frac{m_e v_{max}^2}{2};$$

$$W_{max} = \frac{m_e v_{max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_{вых}.$$

2. Если $W = W_{max} + q\varphi > 0$, то электрон удаляется от пластины, покидая ее.

Если $W = W_{max} + q\varphi_{max} = 0$, то электрон удерживается полем вблизи пластины.

Если $W = W_{max} + q\varphi_{max} < 0$, то электрон возвращается полем на пластину, заряд пластины в дальнейшем не меняется.

3. $W_{max} + q\varphi_{max} \le 0$, $W_{max} + (-e)\varphi_{max} \le 0$;

$$\varphi_{max} = \frac{W_{max}}{|e|} = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A_{вых}}{|e|} = \frac{hc}{\lambda|e|} - \frac{A_{вых}}{|e|};$$

4. $$[\varphi_{max}] = \left[\frac{hc}{\lambda|e|}\right] - \left[\frac{A_{вых}}{|e|}\right] = \frac{Дж \cdot с \cdot м}{м \cdot с \cdot Кл} - \frac{Дж}{Кл} = В.$$

5. Проведем вычисления:

$$\varphi_{max} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3{,}24 \cdot 10^{-7} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} - \frac{3{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} =$$

$$= 3{,}8 - 3{,}7 = 0{,}1 \text{ В}.$$

Ответ: максимальный потенциал пластины 0,1 В

Дано:

$\nu_1 = 2{,}2 \cdot 10^{15}$ Гц
$U_1 = 6{,}6$ В
$\nu_2 = 4{,}6 \cdot 10^{15}$ Гц
$U_2 = 16{,}5$ В

Решение:

1. $h\nu = A_{вых} + \frac{m_e v_{max}^2}{2}$; $\frac{m_e v_{max}^2}{2} = |eU_з|$.

2. $$\begin{cases} h\nu_1 = A_{вых} + |eU_{з1}|; \\ h\nu_2 = A_{вых} + |eU_{з2}|; \end{cases}$$

$$h\nu_2 - h\nu_1 = |eU_{з2}| - |eU_{з1}|;$$

$$h = \frac{|eU_{з2}| - |eU_{з1}|}{\nu_2 - \nu_1} = \frac{|e|(U_{з2} - U_{з1})}{\nu_2 - \nu_1};$$

3. Выполним вычисления:

$$h = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot (16{,}5 - 6{,}6)\ Кл \cdot В}{4{,}6 \cdot 10^{15} - 2{,}2 \cdot 10^{15}\ Гц} = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с.$$

Теперь вылет электронов из пластинки приводит к тому, что она приобретает положительный заряд, потенциал поля становится положительным. Максимальное значение потенциала достигается при максимальном положительном заряде пластинки.

Чем же он определяется?

Рассмотрим энергию электрона: она складывается из максимальной кинетической энергии (ее обеспечивает свет данной частоты) и потенциальной энергии в поле пластины.

В непосредственной близости от пластины потенциальная энергия электрона равна произведению потенциала пластины на заряд электрона. Потенциальная энергия электрона в этом случае отрицательна, а кинетическая — всегда положительная.

Если полная механическая энергия электрона окажется равной нулю, то он не сможет преодолеть притяжение пластинки.

Следовательно, в дальнейшем при облучении пластинки ее заряд перестанет изменяться, а потенциал достигнет максимального значения.

Находя максимальную энергию фотоэлектрона из уравнения Эйнштейна, сможем подсчитать значение максимального потенциала пластины, который можно получить при облучении ее светом данной длины волны.

Задача 11. Найти постоянную Планка, если электроны, выбиваемые из металла светом с частотой $2{,}2 \cdot 10^{15}$ Гц полностью задерживаются напряжением 6,6 В, а выбиваемые светом с частотой $4{,}6 \cdot 10^{15}$ Гц, — разностью потенциалов 16,5 В.

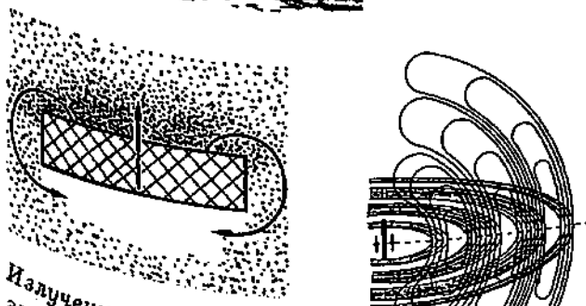
Для решения задачи запишем уравнение фотоэффекта для двух случаев, описанных в условии.

Поскольку светом освещается одна и та же пластинка, то работа выхода из данного металла одинакова в обоих уравнениях, а постоянная Планка — универсальная постоянная. Следовательно, эти два уравнения можно рассматривать как уравнения, составляющие систему с двумя неизвестными.

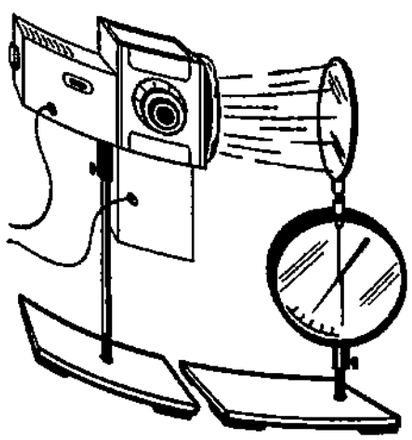
Поскольку нужно найти постоянную Планка, то вычитая из второго уравнения первое, исключим работу выхода и получим уравнение для определения постоянной Планка.

§27. КОРПУСКУЛЯРНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ

Волновой процесс на поверхности воды наблюдается на всей свободной поверхности (нелокализован в пространстве), камни занимают вполне определенное место (локализованы в пространстве)



Излучение звуковых и электромагнитных волн вибраторами приводит к появлению волн во всем окружающем пространстве



Явление фотоэффекта можно объяснить только на основе квантовых представлений о свете

Итак, мы должны признать, что свету присущи как волновые, так и квантовые свойства, поскольку можем указать конкретные явления и опыты (то есть факты), которые могут быть описаны либо в рамках волновой теории света (интерференция, дифракция, поляризация), либо в рамках квантовой теории (фотоэффект), либо успешно обеими теориями (световое давление, отражение света).

Таким образом, свет обладает своеобразным дуализмом (двойственностью) свойств. Это, конечно, странно и непривычно человеку, ведь волна и частица с точки зрения «здравого смысла» — объекты полярные, несовместимые, противоположные.

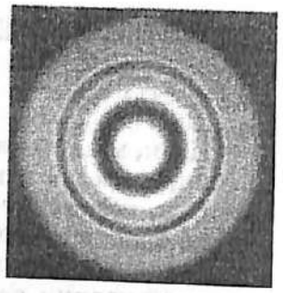
Действительно, когда мы говорим о волне, то представляем себе процесс, происходящий в неограниченном пространстве (или по крайней мере, в значительной области пространства или среды). Волну можно одновременно обнаружить в разных точках пространства. Именно поэтому в классе все ученики, занимающие разное положение в пространстве, могут одновременно слушать одно и то же объяснение учителя, видеть один и тот же опыт, который учитель показывает.

Когда мы говорим о частице, мы представляем себе «комочек вещества», находящийся в данный момент времени в определенном месте, обладающий определенной энергией и движущийся со строго определенной скоростью. При этом мы допускаем, что можно (хотя бы в принципе!) точно определить координаты, импульс и энергию частицы в любой момент времени.

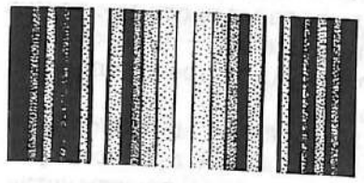
Мы не в состоянии в полной мере представить себе дуализм наглядно. Как такое может быть? Но, справедливости ради, следует признать, что это наше свойство (свойство наблюдателя!), а не свойство всех других объектов природы. Просто мы лишены возможности представлять себе процессы в микромире так же, как процессы в макромире, к которым люди адаптировались на протяжении миллионов лет.

С течением времени дуализм свойств был открыт у электронов. В 1927 году американские ученые К. Д. Дэвиссон и Л. Х. Джермер впервые наблюдали дифракцию

Дифракция света на круглом отверстии

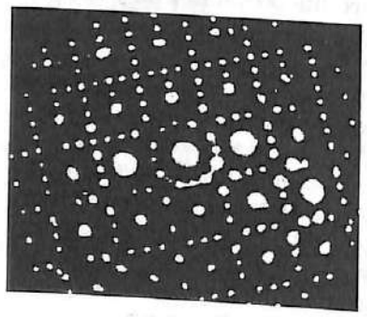


Дифракционная картина, полученная после прохождения пучка электронов через тонкую золотую фольгу

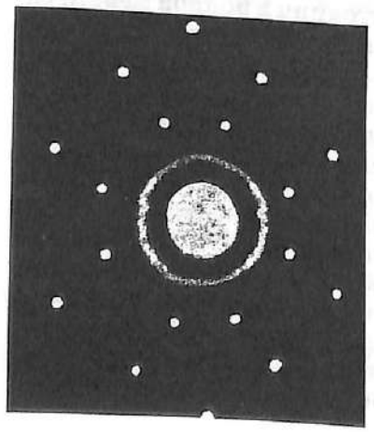


Картина интерференции света от двух параллельных щелей

Картина интерференции двух электронных пучков (при увеличении в 2600 раз)



Дифракционная картина, образованная пучком электронов при прохождении их через кристаллическую пленку соединения бария



Дифракционная картина, образованная пучком нейтронов при прохождении их через кристалл поваренной соли

электронов на монокристаллах. Впоследствии удалось получить на фотопластинке дифракционные кольца, которые получались при прохождении пучка электронов сквозь золотую фольгу. По радиусам этих колец удалось рассчитать «длину волны» электрона!

Совершенствование техники управления электронными пучками привело к созданию «монохроматических пучков» электронов, то есть пучков с очень точно равными импульсами электронов. Если такие пучки электронов наложить друг на друга в некоторой области пространства, то можно наблюдать явление интерференции электронов.

Эти необычные свойства микрообъектов описываются с помощью новой теории — квантовой механики. Это современная теория движения микрочастиц. А как же быть с механикой Ньютона? Следует ли отказаться от нее, поскольку полученные новые результаты несовместимы с выводами классической механики?

Этот вопрос очень волновал многих ученых, которые хорошо понимали, что развитие техники физического эксперимента неизбежно приведет к новым открытиям. В 1923 году в связи с установлением связи квантовой и классической механики Н. Бором был выдвинут **принцип соответствия**. В общей форме принцип соотвествия гласит: **любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание процессов и на более широкие границы применимости, чем старая, должна включать последнюю как предельный случай.**

Принцип соответствия — общий принцип физики, он иллюстрирует преемственность физических теоретических построений и выполняет эвристические (то есть предсказательные) функции, когда речь идет о создании новых физических теорий.

Так теория относительности — теория, в которой изучается движение объектов со скоростями, сравнимыми со скоростью света, привела к пересмотру привычных человеку представлений о пространстве и времени. Но в полном согласии с принципом соответствия, эта новая (поистине революционная!) теория не «отменила» классическую механику, а включила ее как частный случай, справедливый при скоростях движения тела, много меньших скорости света. Основы этой знаменитой теории мы рассмотрим в следующей главе.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ

1. Абсолютно черное тело
2. Гармонический осциллятор
3. Фотон

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

Дуализм : волна — частица.

1. Равномерное прямолинейное движение фотонов в любой однородной среде
2. Волновое движение

ПРИНЦИПЫ

Принцип соответствия:

любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание процессов и на более широкие границы применимости, чем старая, должна включать в себя последнюю как предельный случай.

ЗАКОНЫ

1. Закон излучения абсолютно черного тела
2. Законы фотоэффекта
3. Закон сохранения энергии (уравнение Эйнштейна для фотоэффекта)

ПОСТУЛАТЫ

1. Энергия гармонического осциллятора может принимать дискретный ряд значений, поэтому его энергия может меняться порциями, квантами. Порция энергии прямо пропорциональна частоте излучения.
2. Излучение света происходит квантами, энергия которых прямо пропорциональна частоте света.
3. Поглощение света происходит квантами. В этих процессах квант поглощается целиком и сразу.

ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

1. Излучение		
— тепловое	Связано с ускоренным движением заряженных частиц, находящихся внутри вещества	Спектр излучения зависит:
	Обусловлено тепловым движением частиц вещества	от температуры тела. При температуре, выше 800°С излучается видимый свет;
— электролюминесцентное	Энергия к атомам подводится в результате столкновения атомов с электронами, ускоренными электрическим полем	от энергии электронов и рода вещества;
— катодолюминесцентное		
— хемилюминесцентное	Обусловлено химическими реакциями, в которых энергия выделяется непосредственно в виде света	от типа химических реакций;
— фотолюминесцентное	Переизлучение света атомами вещества в процессе облучения или непосредственно после облучения светом или другими электромагнитными излучениями более высокой частоты	от рода вещества и частоты падающего излучения.
— фосфоресцентное		
2. Фотоэлектрический эффект (фотоэффект)	Явление выбивания электронов из металлов (внешний фотоэффект) или электронов из атомов твердых тел или жидкостей (внутренний фотоэффект) квантами света, частота которых превосходит некоторую постоянную для данного вещества частоту (красная граница фотоэффекта)	Зависит от частоты падающего света и рода вещества (работа выхода из металла)
3. Давление света	Механическое воздействие света на поверхность тела, находящегося в твердом, жидком или газообразном состоянии. Выражается в появлении силы давления на поверхность по нормали к ней. При нормальном падении света сила давления совпадает по направлению с направлением распространения света	Зависит от интенсивности светового потока и характера взаимодействия (отражение или поглощение света данной поверхностью)

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

При изучении волновых процессов мы обратили внимание на тот факт, что состояния любой точки среды, в которой распространяется волна, или значения векторов напряженности и индукции электромагнитного поля в каждой точке пространства обнаруживают периодичность двоякого рода: они повторяются во времени с периодом T и в пространстве с периодом λ. При этом время и координата точки в уравнение бегущей волны входят одинаковым образом: они однозначно определяют фазу колебания в данной точке среды в данный момент времени. В волновом движении, если можно так сказать, обнаруживается внутреннее сходство пространственных и временной координат.

Механические волны можно рассматривать как вид механического движения. Именно так мы и поступали, когда описывали механизм распространения волн в среде и пользовались привычными для механики понятиями координаты, скорости, ускорения, энергии и т.п. При этом мы, как это и полагается, рассматривали движение каждой точки среды в волне в определенной инерциальной системе отсчета (обычно мы связывали ее с неподвижной Землей).

Думаю, никто из вас не сомневается, что рассматривать эти процессы можно и в других инерциальных системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно относительно Земли. Именно так мы поступали, когда рассматривали задачу о движении катера по поверхности воды, в которой распространяются волны, и пользовались принципом относительности Галилея и законом сложения скоростей.

При рассмотрении электромагнитных волн мы пользовались теми же понятиями, что и при изучении механических волн: координата, время, скорость, ускорение, энергия и т.п., то есть полагали, что также имеем дело с движением, но другой природы. При его описании мы также выбирали инерциальную системаму отсчета, молчаливо предполагая, что принцип относительности Галилея применим и для нового, нелокализованного в пространстве объекта: электромагнитного поля. Ничего необычного в таком подходе нет: изучая новые объекты, ученые всегда сначала узнают опытным путем, подчиняются ли они ранее установленным законам, и только потом уточняют или изменяют старые представления.

Вот и мы с вами, изучая электромагнитные волны, проводили широкие аналогии с механическими волнами и получали прекрасное совпадение теоретического предсказания и опыта, когда рассматривали их в рамках выбранной инерциальной системы отсчета. Но мы с вами пока не обсуждали вопрос о том, распространяется ли принцип относительности Галилея на электромагнитные явления.

Именно этот вопрос и возник после того, как во второй половине XIX века Максвеллом были сформулированы основные законы электродинамики. Итак, протекают ли электромагнитные процессы (например, такие как взаимодействие электрических зарядов и токов, распространение электромагнитных волн и т.п.) одинаково во всех инерциальных системах отсчета? Или, может быть, равномерное прямолинейное движение оказывает некоторое воздействие на электромагнитные процессы?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно поступить точно так же, как мы это делали в механике: выяснить, меняются ли основные уравнения электродинамики при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую или нет. Если они не меняются при таком преобразовании, подобно законам Ньютона, то принцип относительности Галилея можно рассматривать как всеобщий закон природы.

Однако, с самого начала стало понятно, что уравнения Максвелла неинвариантны (то есть меняют свою форму) относительно преобразований Галилея. Оказалось, что скорость распространения электромагнитных волн (скорость света) одинакова во всех инерциальных системах отсчета и равна c, что противоречит принципу относительности Галилея. Можно отметить три возможных выхода из сложившейся ситуации. Первая — отказаться от принципа относительности применительно к электродинамики. Вторая — усомниться в правильности самих уравнений Максвелла и попытаться найти другую форму их записи, которая удовлетворяла бы принципу относительности. Третья — сохранить и принцип относительности, и законы Максвелла, но отказаться от классических представлений о пространстве и времени, то есть изменить законы механики. На этом пути и родилась специальная теория относительности.

§28. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА - МОРЛИ. ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Относительность механического движения проявляется:

1. В возможности выбора для описания явления любой системы отсчета.

2. В зависимости траектории и пройденного телом пути от выбора системы отсчета.

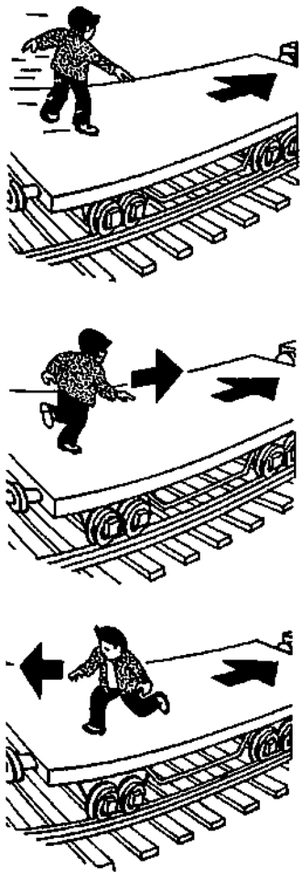
3. В зависимости перемещения тела от выбора системы отсчета.

4. В зависимости скорости движения тела от выбора системы отсчета.

Принцип относительности Галилея:

механические явления протекают одинаково во всех системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно или покоящихся относительно Земли (инерциальные системы отсчета), и описываются одними и теми же законами.

От выбора системы отсчета зависит описание этих явлений.



Изучение специальной теории относительности потребует от нас пересмотра и уточнения многих привычных понятий. А как известно, именно привычное часто считается понятным, хотя истинного понимания сути явлений при этом может и не быть. Эйнштейн развил свою теорию относительности, отвечая на «простые» вопросы не с позиции «здравого смысла», а пытаясь разобраться в существе явления или соответствующей процедуры измерения. При этом сам термин «относительность» следует понимать как зависимость значения той или иной величины от выбора системы отсчета.

В специальной теории относительности рассматриваются только равномерные прямолинейные движения и инерциальные системы отсчета. При изучении механики мы уже отмечали, что говорить о движении, траектории, пройденном телом пути, перемещении, скорости — некорректно, если заранее не оговорено, в какой системе отсчета эти величины рассматриваются или измеряются. Более того, мы установили, что, находясь в инерциальной системе отсчета, мы не можем определить при помощи механических явлений, движется ли эта система и с какой скоростью, относительно других инерциальных систем отсчета.

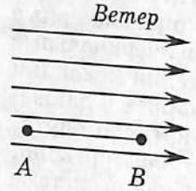
Каждый из вас легко даст ответ на такой вопрос: какова скорость человека, идущего со скоростью 2 м/с по ходу движения поезда, относительно Земли, если скорость движения поезда относительно Земли равна 20 м/с? Воспользовавшись законом сложения скоростей, вы получите привычный результат: 22 м/с. А какой результат вы получите, если вместо человека внутри поезда будет распространяться свет? Его скорость тоже, в соответствии с законом сложения скоростей, увеличится на значение скорости поезда?

А что означает высказывание «скорость света в вакууме равна 300000 км/с»? По отношению к какой системе отсчета?

Вспомните, когда мы рассматривали волновую теорию света, то упоминали о том, что до Максвелла, который высказал предположение об электромагнитной природе света, ученые полагали, что свет распространяется в особой среде — светоносном эфире. И именно в системе отсчета, относительно которой эфир покоится, скорость света и равна 300000 км/с.

А. Майкельсон (1852 — 1931)

v — *скорость ветра;*
c — *скорость самолета;*
$|AB| = |AC| = l$



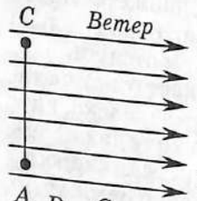
Из A в B: Из B в A:

$$t_1 = \frac{l}{c+v}; \qquad t_2 = \frac{l}{c-v};$$

Из A в B и обратно в A:

$$t_{\text{вдоль}} = t_1 + t_2 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v};$$

$$t_{\text{вдоль}} = \frac{2cl}{c^2 - v^2}.$$



$$\frac{|DC|}{|AD|} = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c} = \sin\alpha;$$

$$|AD| = \frac{|AC|}{\cos\alpha} = \frac{l}{\sqrt{1-\sin^2\alpha}}$$

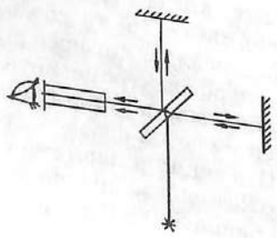
Из A в C:

$$t_1 = \frac{l}{c\sqrt{1-\sin^2\alpha}} = \frac{l}{c\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}};$$

Из A в C и обратно в A:

$$t_{\text{поперек}} = t_1 + t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

$$t_{\text{вдоль}} \neq t_{\text{поперек}}$$



Но это означает, что, измеряя скорость света в другой системе отсчета, которая движется относительно эфира с некоторой скоростью, можно было бы обнаружить движение этой системы по отношению к эфиру и определить скорость этого движения. Поскольку, находясь в данной системе отчета, мы полагаем ее «неподвижной», то (в общем случае) эфир движется относительно ее. Говорят: «возникает эфирный ветер», если, конечно, эфир существует.

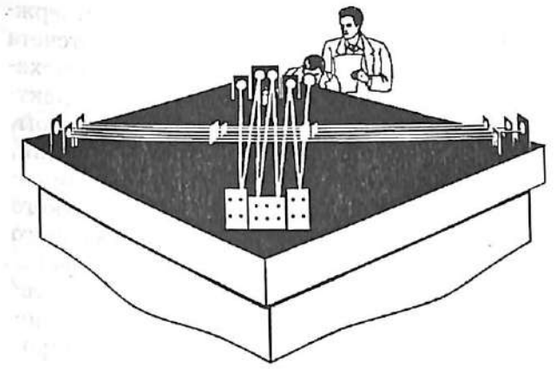
Опыты по обнаружению «эфирного ветра» и были поставлены в 1881 году американскими учеными А. Майкельсоном и Э. Морли по идее, высказанной Максвеллом за 12 лет до этого.

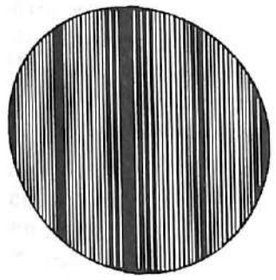
Суть опыта состоит в следующем. Допустим, что нам известно направление «эфирного ветра». Измерим промежуток времени $t_{\text{вдоль}}$, который потребуется свету, чтобы пройти некоторое расстояние l сначала по направлению «ветра», а затем против него. Теперь измерим промежуток времени $t_{\text{поперек}}$, который потребуется свету, чтобы такое же расстояние «туда и обратно» пройти вдоль направления, перпендикулярного направлению движения «эфирного ветра». Посмотрите вычисления, которые приведены в левом столбце, и убедитесь, что эти промежутки времени отличаются друг от друга. Следовательно, зная расстояние l и измеряя промежутки времени $t_{\text{вдоль}}$ и $t_{\text{поперек}}$, можно рассчитать скорость «эфирного ветра» (то есть обнаружить движение собственной инерциальной системы отсчета!).

Теперь расскажем о том, как в опыте Майкельсона-Морли предполагалось измерять столь малые промежутки времени, ведь скорость света очень велика. Для этого ученые решили использовать явление интерференции света. А оно наблюдается, если в одной области пространства свести два когерентных световых пучка, имеющих некоторую разность хода.

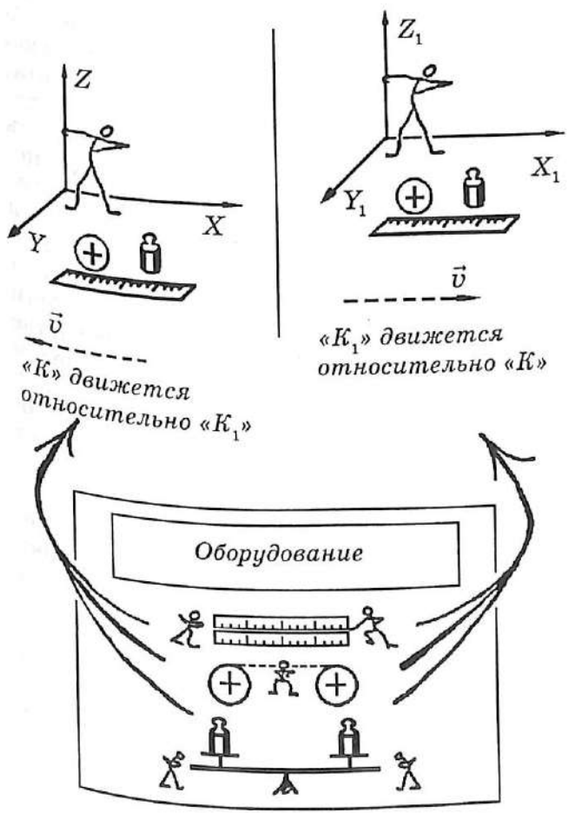
Когерентные пучки получали путем деления одного светового пучка на две части при помощи плоскопараллельной полупрозрачной пластинки. Одна часть света отражалась от ее поверхности, другая — проходила насквозь. При этом, если установить пластинку так, чтобы угол падения лучей был равен 45°, то два когерентных пучка, полученные из одного падающего на пластинку, распространяются по взаимно перпендикулярным направлениям.

Установка для измерения скорости «эфирного ветра» — интерферометр Майкельсона





Интерференционные полосы при повороте интерферометра Майкельсона вокруг вертикальной оси не смещались



При помощи плоских зеркал эти пучки возвращались назад к плоскопараллельной пластинке. Тот пучок, который ранее отражался от нее, теперь проходил пластинку насквозь, а другой, тот который ранее проходил через пластинку, — отражался от нее. Таким образом, разность хода двух волн набиралась только за счет того, что промежутки времени $t_{\text{вдоль}}$ и $t_{\text{поперек}}$ отличаются друг от друга. Результат интерференции наблюдался при помощи зрительной трубы.

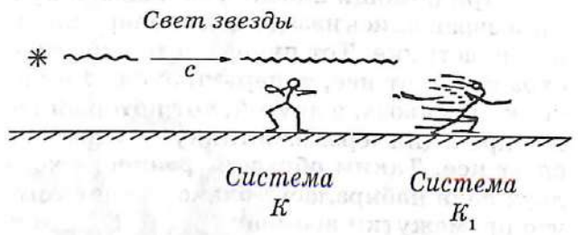
Теперь оставалось решить вопрос о том, как узнать, в какую сторону дует «эфирный ветер». Так как заранее нельзя было дать ответ на этот вопрос, Майкельсон и Морли придумали замечательный ход: они поместили оптическую установку на гранитную плиту, которую поместили в сосуд с ртутью. Плита плавала в ртути и ее можно было без сотрясений легко поворачивать вокруг вертикальной оси.

Ученые предполагали, что интерференционные полосы будут сдвигаться в поле зрения трубы при повороте установки, так как в зависимости от направления «эфирного ветра» должна была изменяться разность времен прохождения светом соответствующих путей. Это смещение полос зависит от разности хода волн, а она, в свою очередь, зависит от разности времен. Следовательно, можно будет определить скорость «эфирного ветра».

Однако, опыт не обнаружил никакого смещения интерференционных полос, хотя наблюдения проводились в течение разного времени суток, в разные времена года на протяжении длительного времени. Следовательно, никакого движения Земли (а именно она выступала в качестве инерциальной системы отсчета) по отношению к эфиру обнаружено не было!

Что же вытекает из этого опыта? Раз мы не обнаружили движения Земли относительно эфира, то идея о существовании преимущественной системы отсчета не выдержала проверки опытом, и, следовательно, отпала необходимость предполагать, что эфир вообще существует. Но тогда получается, что скорость света не зависит от скорости движения источника, который его испускает, то есть для света не выполняется классический закон сложения скоростей!

Для объяснения отрицательных результатов опыта Майкельсона-Морли ученые выдвинули разные гипотезы. В частно-



Постулат *— основное положение, которое не доказано логически, а является результатом обобщения многочисленных опытных данных.*

I постулат СТО

Все законы природы одинаковы в любых инерциальных системах отсчета

II постулат СТО

Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета.

Скорость света не зависит от скорости движения источника или приемника света.

сти А. Эйнштейн предложил такой выход из создавшегося положения. Он дополнил принцип относительности Галилея утверждением, что инерциальные системы отсчета равноправны не только в отношении механических явлений, но и в отношении электромагнитных процессов. Таким образом, сформулировал принцип, утверждающий, что равноправие инерциальных систем отсчета является законом природы: никакого различия в состоянии покоя и равномерного прямолинейного движения не существует.

Таким образом, главный постулат теории относительности — это принцип относительности, который можно сформулировать так: **все законы природы одинаковы в любых инерциальных системах отсчета.**

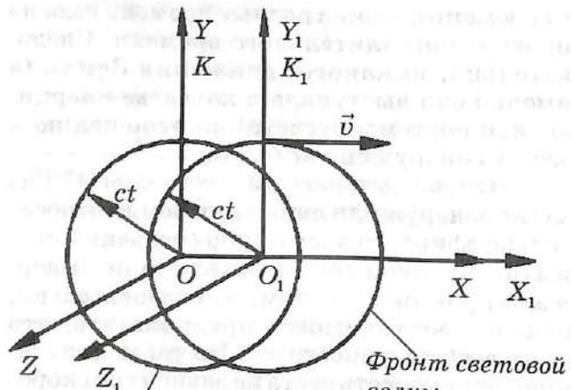
Это означает, что во всех инерциальных системах отсчета физические законы имеют одну и ту же форму. Но тогда и законы электродинамики Максвелла имеют одну и ту же форму в разных инерциальных системах отсчета. Следовательно, скорость света не должна меняться при переходе из одной системы отсчета в другую и должна быть одинаковой во всех инерциальных системах отсчета.

Эйнштейн формулирует это положение как второй постулат теории относительности: **скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета.**

Тогда следствием этих двух постулатов станет утверждение о том, что скорость света не зависит от скорости движения источника или приемника света. Таким образом, свет занимает особое место в мире, в котором мы живем, и в нашей модели мира.

Если последовательно опираться на эти постулаты, придется пересмотреть наши классические представления о пространстве и времени. Чтобы это подтвердить, приведем такой пример. Пусть начала координат двух инерциальных систем отсчета К и $К_1$ в некоторый момент времени совпадали. И в этот момент времени в начале координат произошла вспышка света. За время t система $К_1$ сместилась на расстояние vt по отношению к К, а сферический волновой фронт имеет радиус ct, как в одной, так и в другой (равноправных!) системах К и $К_1$. Следовательно, наблюдатели в этих системах будут полагать, что центры этих сфер находятся в точках О и $О_1$ соответственно. Но ведь не может один и тот же сферический фронт иметь центры в разных точках! В чем тут дело? Давайте разберемся.

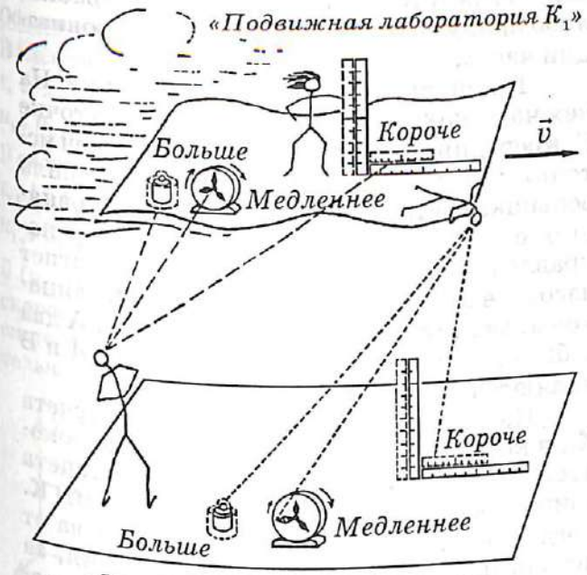
К и $К_1$ — инерциальные системы отсчета
$\vec{v}$ — скорость движения системы $К_1$ относительно системы К



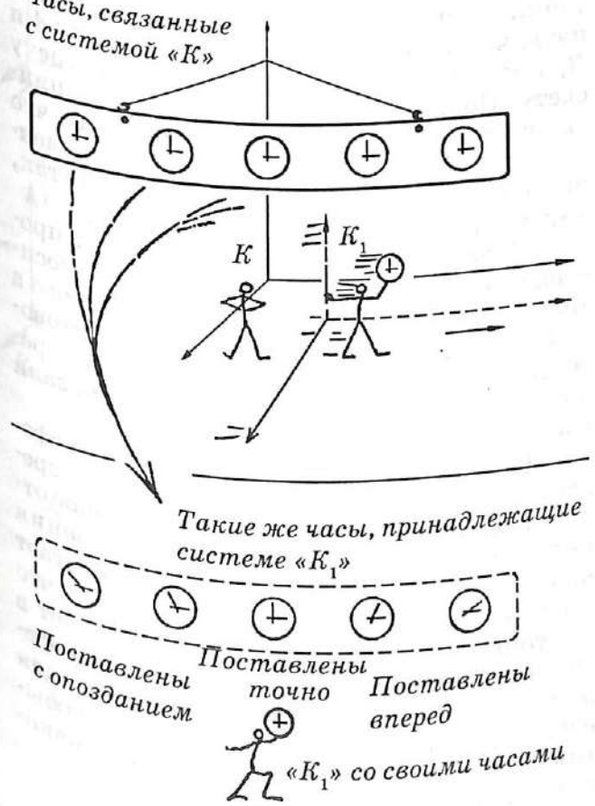
Фронт световой волны с точки зрения наблюдателя, находящегося в системе К

Фронт световой волны с точки зрения наблюдателя, находящегося в системе $К_1$

§ 29. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ РАССТОЯНИЙ И ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ



«Неподвижная лаборатория К»



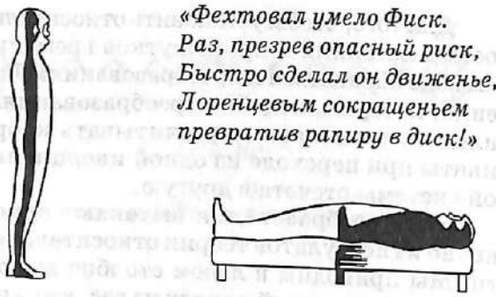
Наверное, самым удивительным и неожиданным для большинства людей, живущих на Земле и пытающихся постичь основы специальной теории относительности, является утверждение о том, что события, одновременные для одного наблюдателя, оказываются неодновременными для другого. Ведь до начала XX века никто на Земле не сомневался в том, что время абсолютно и течет совершенно **независимо** от нас с вами, от материи и ее движения раз и навсегда заданным темпом.

Однако, если вдуматься, то можно понять, что представление об абсолютности времени и абсолютности одновременности связано с представлением о возможности мгновенной (вневременной) передачи сигналов из одной точки пространства в другую.

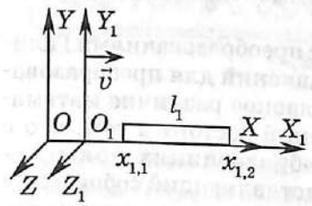
Действительно, если мы рассматриваем два события, которые произошли в разных точках пространства (в СТО в таких случаях говорят: пространственно разделенные события), то утверждение о том, что эти события одновременные, означает, что синхронизованные часы (исправные и верно идущие!) показывают одно и то же время. А как синхронизовать часы, которые находятся в разных точках пространства?

Если допустить, что сигнал может распространяться мгновенно, то будучи посланным из точки A в 13.00, он прибудет в точку B тоже в 13.00. Если часы, находящиеся в точке B, показывают такое же время, то они идут синхронно с часами в точке A. Если их показание иное, то часы можно синхронизовать, подведя их вперед или назад по обстоятельствам.

Значит, установить, являются ли два пространственно разделенных события одновременными, можно только располагая синхронизованными часами, находящимися в точках, в которых эти события происходят. Но сигналов, распространяющихся мгновенно, в природе не существует. С самой большой (но конечной!) скоростью распространяется свет или электромагнитные сигналы. Их скорость в вакууме постоянна и имеет строго определенное значение. Именно с помощью таких сигналов мы устанавливаем свои часы «по московскому времени», сверяя их с эталонными часами. Конечно, в принципе всегда можно ввести поправку на запаздывания сигнала, если



«Фехтовал умело Фиск.
Раз, презрев опасный риск,
Быстро сделал он движенье,
Лоренцевым сокращеньем
превратив рапиру в диск!»

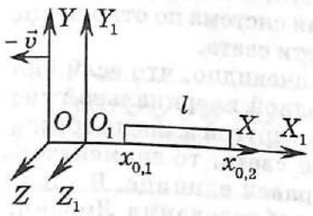


В системе $К_1$ длина стержня равна:

$$l_1 = x_{1,2} - x_{1,1}.$$

А в системе К:

$$l = x_{0,2} - x_{0,1}.$$



В системе К длина стержня равна:

$$l = x_{0,2} - x_{0,1}.$$

А в системе $К_1$:

$$l_1 = x_{1,2} - x_{1,1}.$$

В системе $К_1$:

$$l_1 = x_{1,2} - x_{1,1} = \frac{x_{0,2} - \upsilon t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{x_{0,1} - \upsilon t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{x_{0,2} - x_{0,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}};$$

$$l_1 = \frac{x_{0,2} - x_{0,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}; \qquad l = l_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}.$$

В системе К:

$$l = x_{0,2} - x_{0,1} = \frac{x_{1,2} + \upsilon t_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{x_{1,1} + \upsilon t_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{x_{1,2} - x_{1,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}};$$

$$l = \frac{x_{1,2} - x_{1,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}; \qquad l_1 = l \cdot \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}.$$

Длина покоящегося стержня l больше длины l_1 того же движущегося стержня:

$$l_1 = l\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}$$

Следствием преобразований Лоренца является зависимость расстояния между двумя точками от выбора системы отсчета или, говоря иначе, относительность расстояний.

Рассмотрим твердый стержень, покоящийся в системе отсчета $К_1$. Если он расположен вдоль оси OX_1, то его длина равна:

$$l_1 = x_{1,2} - x_{1,1}.$$

Это длина покоящегося стержня. Какой будет длина этого стержня с точки зрения наблюдателя, находящегося в системе К, относительно которой $К_1$ движется со скоростью υ в направлении оси OX?

Думаю, каждый из вас скажет, что нужно найти разность координат этих же точек в системе отсчета $К_0$, относящихся к одному и тому же моменту времени t в этой системе отсчета: $l = x_{0,2} - x_{0,1}$.

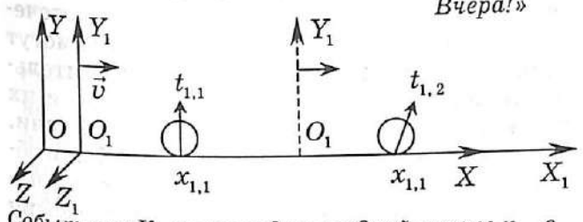
Так как фиксированным является момент времени t, то чтобы найти искомую длину стержня нужно воспользоваться преобразованиями Лоренца, содержащими именно время, измеряемое по часам в системе К. Несложные преобразования позволяют получить следующий результат: длина движущегося стержня меньше длины того же покоящегося во столько раз, каково значение квадратного корня из разности между единицей и квадратом отношения скорости движения СО к скорости света.

Если теперь рассмотреть тот же стержень в системе отсчета К, и рассчитать его длину с точки зрения наблюдателя, находящегося в $К_1$, то получим тот же результат: движущийся стержень имеет меньшую длину, чем тот же стержень, но покоящийся. То есть длина не является абсолютной величиной, а зависит от скорости движения объекта. Абсолютным является утверждение, что покоящийся стержень всегда длиннее такого же движущегося.

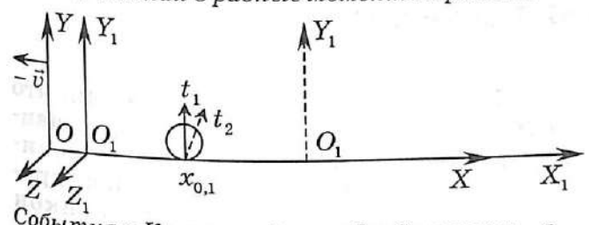
Длины всех тел, находящихся в одной системе отсчета изменяются в одно и то же число раз, то есть пропорционально. По этой причине, находясь в одной системе, невозможно обнаружить лоренцево сокращение. Но оно не является субъективным или кажущимся. Лоренцово сокращение (то есть зависимость длины от выбора системы отсчета) является столь же объективным, как, скажем, зависимость кинетической энергии тела от его скорости (т. е. от выбора ИСО).

Относительность расстояний также обусловлена относительностью одновременности событий, так как с точки зрения

«Сегодня в полдень пущена ракета.
Она летит куда быстрее света.
И в цель прибудет ровно в семь утра...
Вчера!»



События в $К_1$ происходят в одной точке $x_{1,1}$ в разные моменты времени $t_{1,1}$ и $t_{1,2}$, а в К в разных точках в разные моменты времени.



События в К происходят в одной точке $x_{0,1}$ в разные моменты времени t_1 и t_2, а в $К_1$ в разных точках в разные моменты времени.

В системе К:

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{t_{1,2} + \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x_{1,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{t_{1,1} + \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x_{1,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}};$$

$$\tau = \frac{t_{1,2} - t_{1,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{\tau_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}};$$

В системе $К_1$:

$$\tau_1 = t_{1,2} - t_{1,1} = \frac{t_2 - \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x_2}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{t_1 - \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}};$$

$$\tau_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{(x_2 - x_1)\frac{\upsilon}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{(x_2 - x_1)\frac{\upsilon}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}};$$

Найдем $(x_2 - x_1)$.

$$x_2 - x_1 = \frac{x_{1,2} + \upsilon t_{1,2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{x_{1,1} + \upsilon t_{1,1}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{\upsilon \tau_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}},$$

так как $x_{1,2} = x_{1,1}$. Тогда:

$$\frac{(x_2 - x_1)\frac{\upsilon}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{\upsilon \tau_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \cdot \frac{\frac{\upsilon}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \tau_1 \cdot \frac{\frac{\upsilon^2}{c^2}}{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}};$$

одного наблюдателя другой засекает положение концов стержня неодновременно.

Рассмотрим вопрос об относительности промежутков времени. Теперь нам нужно рассматривать события, происходящие в одной точке пространства в разные моменты времени, и вычислять промежуток времени между этими событиями.

Пусть в системе $К_1$ в точке с координатой $x_{1,1}$ первое событие (например, удар метронома) происходит в момент времени $t_{1,1}$, а другое (следующий удар метронома) — в момент времени $t_{1,2}$. Тогда промежуток времени между этими двумя событиями равен:

$$\tau_1 = t_{1,2} - t_{1,1}.$$

В этой системе отсчета события происходят в одной точке. С точки зрения наблюдателя, находящегося в системе К, относительно которой $К_1$ движется, эти события происходят в разных точках и промежуток времени между ними равен:

$$\tau = t_2 - t_1.$$

Используя преобразования Лоренца для времени, получим, что промежуток времени, измеренный по часам, относительно которых события «движутся», то есть происходят в разных точках в разные моменты времени, больше, чем промежуток времени, измеренный по часам системы, где эти события происходят в одной точке. Значит, временной интервал или промежуток времени между двумя событиями является величиной относительной. Он зависит от скорости движения одной инерциальной системы относительно другой.

Временной интервал, измеренный в системе отсчета, где события «покоятся», то есть происходят в одной точке, называется **собственным**. Оно оказывается минимальным. И этот факт имеет такое же абсолютное значение, что и утверждение о том, что собственная длина покоящегося стержня максимальна.

Этот эффект обычно называют замедлением времени в движущихся системах отсчета. Нетрудно показать, что и в отношении временных промежутков имеет место равноправие инерциальных систем отсчета.

Явление замедления времени обнаруживается экспериментально при наблюдении распада некоторых нестабильных элементарных частиц в космическом излучении. Так как они движутся со скоростями близкими к скорости света, то это увеличение собственного времени жизни

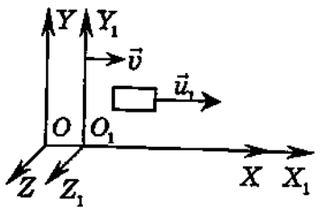
$$\tau_1=\frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};\quad \tau_1=\tau\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}};\quad \tau_1\cdot\frac{\frac{v^2}{c^2}}{1-\frac{v^2}{c^2}};\quad \tau_1\left(1+\frac{\frac{v^2}{c^2}}{1-\frac{v^2}{c^2}}\right)=\frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$

$$\frac{\tau_1}{1-\frac{v^2}{c^2}}=\frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};\qquad \tau=\frac{\tau_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Промежутки времени τ_1, измеренные в собственной системе отсчета, минимальны.

частицы (то есть промежутка времени от рождения частицы до ее распада) может оказаться весьма значительным. Этот факт обнаруживается в том, что в системе отсчета, связанной с Землей, эти частицы могут проходить расстояния, которые значительно превышают произведение скорости их движения на их собственное время жизни. Благодаря этому эффекту на Земле были обнаружены нестабильные элементарные частицы, проникающие в земную атмосферу из космического пространства.

§ 30. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА



Тело движется в системе K_1 со скоростью u_1.

После того, как мы обнаружили, что временные промежутки и расстояния зависят от скорости движения одной инерциальной системы отсчета относительно другой, нетрудно догадаться, что и закон сложения скоростей, который ранее мы устанавливали, исходя из классических представлений о времени и длине, требует пересмотра.

Классический закон сложения скоростей не может быть справедливым хотя бы потому, что он не накладывает каких-либо ограничений на значение скорости движения тела: она вполне может оказаться больше скорости света.

Мы получим закон сложения скоростей для частного случая, когда движение тела происходит в направлении оси OX_1, вдоль которой происходит и движение самой системы отсчета K_1 по отношению к системе К. Координатные оси OY_1 и OZ_1 остаются параллельными соответствующим осям системы отсчета К. Сразу будем рассматривать закон сложения для проекций скоростей на выбранные координатные оси. При этом скорость движения системы отсчета K_1 будем, как и прежде, обозначать буквой v, а скорость тела, движущегося в этой системе буквой u_1.

Воспользуемся преобразованиями Лоренца, чтобы найти малый промежуток времени Δt_1 в системе отсчета K_1, в течение которого координата движущегося тела в этой системе изменится на величину Δx_1. Разделим почленно первое равенство на второе. Заменяя отношение изменения координаты ко времени, за которое это изменение произошло в каждой из систем отсчета, найдемсвязь проекции скорости тела в системе K_1 с проекцией скорости этого тела в системе отсчета К. Это и есть закон сложения скоростей в теории относительности.

В системе отсчета К:

$$\Delta x=\frac{\Delta x_1+v\Delta t_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};\qquad \Delta t=\frac{\Delta t_1+\frac{v}{c^2}\cdot\Delta x_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Разделим почленно первое на второе:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{\Delta x_1+v\Delta t_1}{\Delta t_1+\frac{v}{c^2}\cdot\Delta x_1};$$

Разделим числитель и знаменатель правой части на Δt_1:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{\frac{\Delta x_1}{\Delta t_1}+v}{1+\frac{v}{c^2}\cdot\frac{\Delta x_1}{\Delta t_1}};\qquad u_x=\frac{u_{1x}+v}{1+\frac{v\cdot u_{1x}}{c^2}}.$$

В нерелятивистском случае, когда $v\ll c$, $u_1\ll c$, получим:

$$u_x=\frac{u_{1x}+v}{1+\frac{v\cdot u_{1x}}{c^2}}=u_{1x}+v.$$

Если $u_{1x}=c$, то имеем:

$$u_x=\frac{c+v}{1+\frac{v\cdot c}{c^2}}=\frac{(c+v)\cdot c^2}{c^2+v\cdot c}=\frac{(c+v)\cdot c^2}{(c+v)\cdot c}=c.$$

Если $v=c$ и $u_1=c$, то получим:

$$u_x=\frac{c+c}{1+\frac{c\cdot c}{c^2}}=\frac{2c}{2c^2}\cdot c^2=c.$$

Скорость света в вакууме является предельной (максимально возможной) скоростью в нашем мире. Скорости движения тел, большие скорости света в вакууме, — ненаблюдаемы.

$$\vec F=m\vec a;\qquad \vec a=\frac{\Delta\vec v}{\Delta t};$$

$$\vec F=m\cdot\frac{\Delta\vec v}{\Delta t}.$$

В классической динамике, если Δt велико, то при $\vec F=\text{const}$, $\vec v\uparrow\uparrow$, так что возможно $v\geq c$.

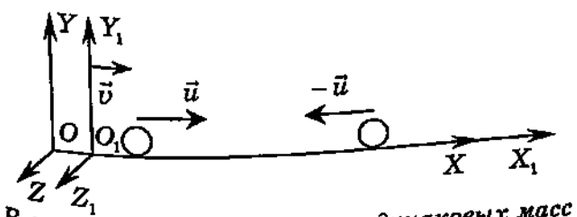
Возможные альтернативные допущения:

1. Масса тела зависит от скорости. При этом при увеличении скорости масса должна возрастать так, чтобы при $v\to c$, $m\to\infty$.

2. Так как в импульсной форме второй закон Ньютона имеет следующий вид:

$$\vec F=\frac{\Delta\vec p}{\Delta t},$$

то можно предположить, что импульс зависит от скорости иначе, чем в классической механике.

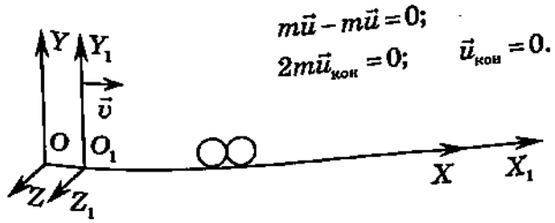


В системе отсчета К шары одинаковых масс движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями u. Между ними происходит абсолютно неупругий удар. Скорость шаров после взаимодействия равна нулю.

$$m\vec u+(-m\vec u)=2m\vec u_{\text{кон}};$$

$$m\vec u-m\vec u=0;$$

$$2m\vec u_{\text{кон}}=0;\qquad \vec u_{\text{кон}}=0.$$



Нетрудно заметить, что в случае, когда скорость движения тела и скорость движения одной системы отсчета относительно другой малы по сравнению со скоростью света, мы получим классический закон сложения скоростей.

Рассмотрим теперь случай, когда одна из скоростей или обе скорости, фигурирующие в полученной формуле, равны скорости света. Несложные преобразования позволяют увидеть, что тогда скорость света не может быть превышена. То есть этот закон сложения скоростей отвечает требованию предельности скорости света.

Таким образом, скорость света является максимально возможной скоростью передачи взаимодействия в природе. Скорости большие c (скорости света в вакууме) не наблюдаются.

Полученный нами факт требует нового осмысления второго закона динамики Ньютона. Действительно, этот закон устанавливает связь между силой, действующей на тело, и ускорением, которое приобретает данное тело в результате действия силы. Ускорение, в свою очередь, определяет изменение скорости тела за 1 с. Поскольку в этом законе нет ограничений ни на значение силы, ни на время ее действия, то, вообще говоря, для каждого наперед заданного значения силы можно рассчитать промежуток времени, в течение которого скорость тела может быть увеличена от нуля до скорости света или любого другого большего значения.

Первое, что может прийти в голову, чтобы «спасти» второй закон Ньютона, это допустить, что масса тела может зависеть от скорости тела. Допустим, что по мере увеличения скорости масса тела увеличивается. Тогда данная сила сообщает этому телу меньшее ускорение. Скорость тела продолжает увеличиваться, но теперь это изменение происходит медленнее. Но новое увеличение скорости снова приводит к увеличению массы, а оно — к уменьшению ускорения и так далее.

Можно допустить, что масса тела неограниченно возрастает при приближении скорости тела к скорости света. Тогда скорость света становится предельным и недостижимым значением скорости для любого тела с массой $m>0$.

Можно предложить и другой подход.

В системе K_1 скорости шаров до взаимодействия найдем по закону сложения скоростей:

$$u_{1,x}=\frac{u-v}{1-\frac{uv}{c^2}}; \qquad u_{2,x}=\frac{-u-v}{1+\frac{uv}{c^2}}.$$

Тогда начальный импульс системы шаров равен:

$$p_{x,\text{нач}}=m\cdot\frac{u-v}{1-\frac{uv}{c^2}}+m\cdot\frac{-u-v}{1+\frac{uv}{c^2}}=-\frac{2mv}{1-\frac{u^2v^2}{c^4}};$$

После взаимодействия шары движутся со скоростью $-\vec{v}$, так как в системе К они покоятся после соударения. Следовательно, их конечный импульс равен:

$$p_{x,\text{кон}}=-2mv.$$

Получается: $p_{x,\text{кон}}\neq p_{x,\text{нач}}$, то есть в инерциальной системе отсчета не выполняется закон сохранения импульса!

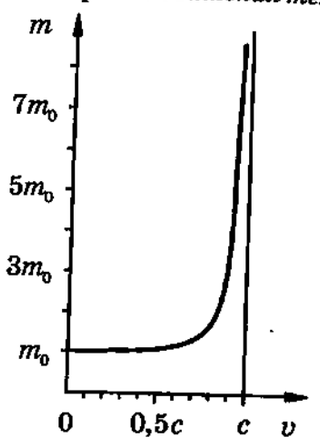
Если принять, что масса тела зависит от скорости его движения $\vec{u}$, то

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

тогда под импульсом следует понимать величину

$$\vec{p}=\frac{m_0\vec{u}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \quad \text{или} \quad p_x=\frac{m_0u_x}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}},$$

в этом случае закон сохранения импульса выполняется и в релятивистском случае.
В этих формулах m_0 — масса покоя тела, то есть масса, измеренная в системе отсчета, относительно которой тело покоится, а $\vec{u}$ — скорость движения тела.



При увеличении скорости движения тела его масса (и импульс) неограниченно возрастают, так что скорость тела не может превысить скорость света в вакууме

Запишем второй закон Ньютона в импульсной форме. Тогда можно предположить, что импульс тела, который в классической физике равен произведению массы тела на его скорость, при релятивистских скоростях зависит от скорости несколько иначе. Как? Чтобы получить общую формулу для расчета импульса, рассмотрим задачу об абсолютно неупругом соударении двух одинаковых шаров, движущихся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями.

С точки зрения наблюдателя в системе К начальный импульс системы из двух шаров равен нулю. После столкновения эти шары остановятся, что соответствует такому же нулевому значению импульса этой системы тел в другом состоянии.

Если рассмотреть этот же процесс с позиций наблюдателя, находящегося в системе K_1, движущейся относительно К со скоростью v в направлении оси OX, то получим другой результат. Посмотрите выкладки, приведенные в левом столбце. Начальный импульс системы шаров не равен конечному, хотя закон сохранения импульса — фундаментальный закон природы.

Если допустить, что масса тела не меняется при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую, а релятивистский импульс можно сосчитать по формуле:

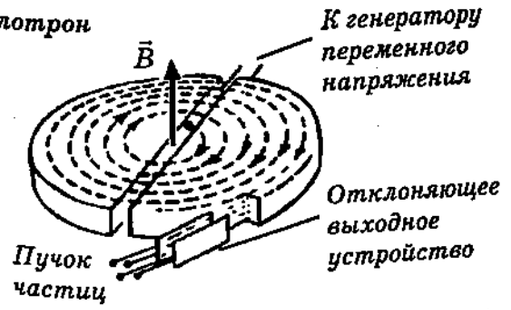
$$\vec{p}=\frac{m_0\vec{u}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \quad \text{или} \quad p_x=\frac{m_0u_x}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}},$$

то закон сохранения импульса выполняется и в системе К, и в системе K_1.

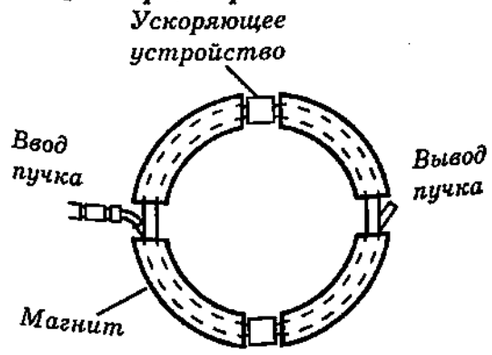
Тогда становится понятным, что при действии на тело некоторой силы импульс тела увеличивается, вместе с ним растет скорость тела. При приближении скорости тела к скорости света, знаменатель дроби уменьшается, стремясь к нулю. Импульс тела при этом увеличивается неограниченно и скорость тела практически перестает изменяться. Она может быть весьма близка к значению скорости света, но никогда этого значения не достигает.

Этот факт имеет экспериментальное подтверждение. Ускорение заряженных элементарных частиц (протонов и электронов) в циклотронах и синхрофазотронах подчиняется законам релятивистской динамики. В циклотроне заряженная частица описывает окружность, радиус которой зависит от импульса частицы. При малых, по сравнению со скоростью света, скоростях период обращения частицы не зависит от его скорости, поэтому разгоняясь в электрическом поле на определенных участках траектории, заряженные частицы постепенно переходят на траектории все большего радиуса. По мере увеличения импульса частицы радиус быстро растет и период обращения перестает быть постоянным. Поэтому циклотрон не способен разгонять частицы до очень больших энергий.

Циклотрон



Синхрофазотрон — релятивистский прибор



В синхрофазотроне используются переменные электрические поля, разгоняющие частицы на небольших прямолинейных участках траектории, и переменное, постоянно нарастающее магнитное поле, которое «закручивают» частицу, заставляя ее двигаться по окружности примерно одного радиуса. Необходимое согласование между ростом скорости частицы и ростом частоты ее обращения с увеличением магнитного поля рассчитывается по релятивистской динамике. Тем самым работа прибора подтверждает теорию относительности.

§ 31. ИМПУЛЬС И ЭНЕРГИЯ. ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

Рассмотрим случай $v\ll c$:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}+\frac{v^4}{4c^4}-\frac{v^4}{4c^4}}=\sqrt{\left(1-\frac{v^2}{2c^2}\right)^2-\frac{v^4}{4c^4}}\approx$$

$$\approx 1-\frac{v^2}{2c^2}, \quad \text{так как} \quad \frac{v^4}{4c^4}\ll\frac{v^2}{2c^2}\ll 1.$$

Тогда:

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\approx\frac{m_0}{1-\frac{v^2}{2c^2}}=\frac{m_0\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)}{\left(1-\frac{v^2}{2c^2}\right)\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)}=$$

$$=\frac{m_0\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)}{1-\frac{v^4}{4c^4}}\approx m_0\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right);$$

$$m=m_0+\frac{1}{c^2}\cdot\frac{m_0v^2}{2}; \qquad \Delta m=\frac{1}{c^2}\cdot\frac{m_0v^2}{2};$$

Изменение массы тела при увеличении его скорости равно сообщенной телу кинетической энергии, деленной на квадрат скорости света.

$$mc^2=m_0c^2+\frac{m_0v^2}{2}$$

Важнейшим для цивилизации XX века следствием теории относительности является установление универсальной связи между энергией тела и его массой. Эта связь наиболее отчетливо проявляется в микромире — мире атомных ядер и элементарных частиц.

Энергия, как и импульс, относится к числу величин, для которых выполняются законы сохранения. В релятивистской механике энергия движущегося тела массой m_0 равна

$$W=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Из этого выражения видно, что энергия тела не обращается в нуль даже тогда, когда скорость тела становится равной нулю в данной системе отсчета.

Когда скорость тела равна нулю, энергия тела равна произведению его массы на квадрат скорости света:

$$W_0=m_0c^2.$$

То есть любое тело обладает энергией уже только благодаря факту своего существования, и эта энергия прямо пропорциональна массе этого тела.

Раньше, в молекулярно-кинетической теории, такую энергию мы называли внут-

$W = mc^2$ – полная энергия тела;

$W_0 = m_0c^2$ – энергия покоя тела;

$\frac{m_0v^2}{2}$ – кинетическая энергия тела.

Связь импульса и энергии тела

1. В классической физике:

$$W_к = \frac{mv^2}{2}; \qquad p = mv;$$

$$W_к = \frac{mv^2}{2} = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}.$$

2. В релятивистской механике:

$$p = \frac{m_0v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}};$$

Возведем в квадрат обе части равенства:

$$\frac{(m_0v)^2}{1-\frac{v^2}{c^2}} = p^2; \qquad (m_0v)^2 = p^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right);$$

$$(m_0v)^2 + p^2\frac{v^2}{c^2} = p^2; \quad v^2 = \frac{p^2}{m_0^2 + \frac{p^2}{c^2}};$$

$$W = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \qquad W^2 = \frac{(m_0c^2)^2}{1-\frac{v^2}{c^2}};$$

$$W^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) = m_0^2c^4.$$

Подставим выражение для v^2:

$$W^2 - \frac{W^2}{c^2}\cdot\frac{p^2}{m_0^2 + \frac{p^2}{c^2}} = m_0^2c^4;$$

$$W^2\cdot\left(1-\frac{p^2}{m_0^2c^2 + p^2}\right) = m_0^2c^4;$$

$$W^2\cdot\frac{m_0^2c^2 + p^2 - p^2}{m_0^2c^2 + p^2} = m_0^2c^4;$$

$$W^2 = \left(m_0^2\cdot c^2 + p^2\right)\cdot c^2;$$

$$W = c\sqrt{p^2 + m_0^2c^2}.$$

ренней энергией тела. Эта формула применима и к телу, состоящему из большого числа отдельных частиц. В этом случае под массой надо подразумевать полную массу тела, а под скоростью — скорость его движения как целого.

При малых скоростях выражение для энергии тела можно представить в другом виде. Мы приводим выкладки в левом столбце, чтобы было понятно, как получена следующая очень важная формула, по которой можно рассчитать энергию тела, движущегося со скоростью v:

$$W = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2}; \qquad W = W_0 + \frac{m_0v^2}{2}.$$

Таким образом, когда тело вследствие взаимодействия с другими телами приобретает скорость, его энергия покоя увеличивается на величину кинетической энергии.

Чтобы установить связь между энергией тела и его импульсом, запишем формулы для энергии и импульса тела массой m_0, движущегося со скоростью v. Тогда нетрудно получить, что импульс тела прямо пропорционален его энергии.

Если снова обратиться к формулам релятивистского импульса и энергии релятивистской частицы (тела), то станет ясно, что при скорости, равной скорости света, импульс и энергия частицы становятся неограниченно большими. Это означает, что частица, имеющая отличную от нуля массу, не может двигаться со скоростью света.

Зато в релятивистской механике могут существовать частицы, которые обладают энергией и импульсом, но не имеют «массы покоя». Это частицы, которые всегда имеют скорость, равную скорости света. Их нельзя ни затормозить, ни ускорить, они не существуют вне движения со скоростью c. Примером таких частиц являются уже известные вам фотоны — кванты света.

Снова обратимся к формуле, устанавливающей связь энергии тела с его массой. Нетрудно сообразить, что если речь идет о нескольких телах, составляющих какую-то систему, то из-за аддитивности энергии (и массы) аналогичное соотношение можно записать и для этой системы тел.

Допустим, что в результате некоторого процесса масса системы тел изменилась (например, уменьшилась, как уменьшается суммарная масса ядер и частиц, образовавшихся в результате распада ядра урана). Следовательно, уменьшилась и энергия покоя продуктов данного распада. Но полная энергия должна сохраниться, следовательно, возникают излучения, которые «уносят» с собой часть выделившейся энергии, а образующиеся ядра и частицы еще и приобретают огромные скорости.

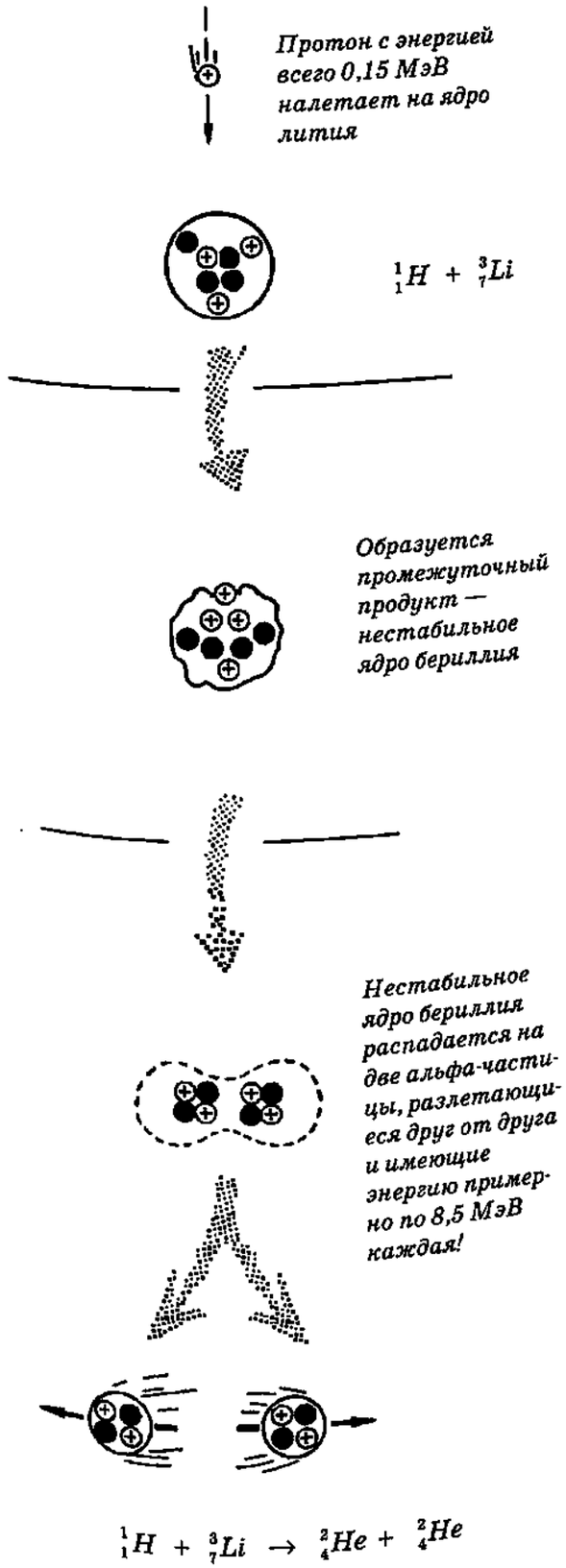
Таким образом, специальная теория относительности предсказала, а затем это было неоднократно подтверждено экспериментально, что энергия и масса эквивалентны: изменение энергии тела сопровождается эквивалентным изменением его массы и наоборот, изменение массы тела сопровождается изменением энергии тела.

Завершая знакомство со специальной теорией относительности, сделаем еще одно, очень важное, с нашей точки зрения, замечание.

Рассмотрим твердое тело. Допустим, что в результате некоторого воздействия в какой-то одной его точке, оно приведено в движение. Если бы тело было абсолютно твердым, то все его точки должны были бы одновременно прийти в движение с той точкой, которая подверглась воздействию. В классической механике такое явление вполне возможно благодаря мгновенности распространения взаимодействий.

В рамках теории относительности это невозможно, так как воздействие от данной точки передается к другим с конечной скоростью. Именно поэтому все точки не могут прийти одновременно в движение — тело деформируется, то есть абсолютно твердых тел не существует, это — только физическая модель твердого тела.

Из сказанного вытекают интересные выводы относительно так называемых «элементарных» частиц. Под элементарными частицами в физике подразумеваются частицы, которые во всех физических явлениях проявляют себя как нечто целое, то есть не имеет смысла говорить об их составных частях. Но тогда элементарные частицы в теории относительности не должны иметь конечных размеров. Они должны рассматриваться как геометрические точки. В противном случае, то есть если бы элементарная частица имела конечные размеры, то она не должна была бы быть деформируемой, так как само понятие деформации связано с возможностью независимого движения отдельных частей тела. Иначе говоря, элементарная частица, имеющая конечные размеры должна была бы вести себя как абсолютно твердое тело, а их существование противоречит теории относительности.


Протон с энергией всего 0,15 МэВ налетает на ядро лития
$^1_1H + {}^3_7Li$
Образуется промежуточный продукт — нестабильное ядро бериллия
Нестабильное ядро бериллия распадается на две альфа-частицы, разлетающиеся друг от друга и имеющие энергию примерно по 8,5 МэВ каждая!
$^1_1H + {}^3_7Li \rightarrow {}^2_4He + {}^2_4He$

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ:

МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ	МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ	МОДЕЛИ ПРОЦЕДУР
Инерциальная система отсчета	Равномерное прямолинейное движение	Синхронизация часов

ПРИНЦИПЫ

Принцип относительности:

все законы природы одинаковы в любых инерциальных системах отсчета.

Принцип соответствия:

любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание процессов и на более широкие границы применимости, чем старая, должна включать в себя последнюю как предельный случай.

ПОСТУЛАТЫ

1. Физические законы одинаковы в любых инерциальных системах отсчета.
2. Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета.

Скорость света не зависит от скорости движения источника и приемника света.

ОСНОВНЫЕ СЛЕДСТВИЯ СТО

1. Относительность одновременности	Пространственно разделенные события одновременные в одной инерциальной системе отсчета не являются одновременными в другой инерциальной системе отсчета	
2. Относительность промежутков времени	Промежутки времени, измеренные в собственной системе отсчета, минимальны. (Эффект замедления времени в движущейся ИСО)	$\tau_1 = \dfrac{\tau}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$
3. Относительность расстояний	Длина покоящегося стержня максимальна: то есть длина, измеренная в собственной системе отсчета, больше длины того же движущегося стержня. (Эффект продольного сокращения длины)	$l_1 = l\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}$
4. Релятивистский закон сложения скоростей	Закон сложения скоростей имеет такую форму, при которой скорость объекта ни при каких условиях движения не может превысить скорость света. Таким образом, скорость света в вакууме выступает в роли предельной скорости в нашем мире.	$u_x = \dfrac{u_{1x}+v}{1+\dfrac{u_{1x}v}{c^2}}$
5. Зависимость массы тела от скорости его движения	При увеличении скорости движения масса тела увеличивается. При релятивистских значениях скорости масса тела неограниченно возрастает.	$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$
6. Эквивалентность массы и энергии	Полная энергия тела и его масса взаимосвязаны: энергия тела не обращается в нуль даже тогда, когда скорость тела становится равной нулю в данной системе отсчета (остается внутренняя энергия тела). Изменение полной энергии тела сопровождается эквивалентным изменением его массы.	$mc^2 = m_0c^2 + \dfrac{m_0v^2}{2}$

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ №1

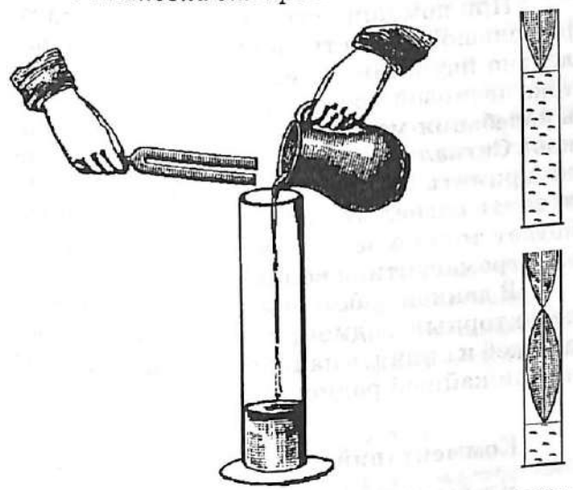
Лабораторная работа № 1

Определение длины звуковой волны и скорости звука в воздухе методом акустического резонанса

Цель работы: получить стоячие волны в воздушном столбе, измерить длину звуковой волны и рассчитать скорость звука в воздухе.

Оборудование: стеклянный цилиндр, камертон, сосуд с водой, измерительная лента.

Установка для проведения исследования:



Приступая к *выполнению работы,* составьте ее план. Учтите, что необходимо получить стоячую волну в воздушном столбе, ограниченном снизу свободной поверхностью воды в цилиндре.

Оценка погрешности измерений

В работе проводится прямое измерение высоты воздушного столба, в котором возникает стоячая волна. При определении на слух момента, при котором наступает резонанс, возможны случайные ошибки. Поэтому опыт следует повторить несколько раз и оценить значение случайной ошибки при определении высоты столба методом среднего арифметического.

Последующие расчеты погрешности можно провести либо методом границ, либо при помощи относительной погрешности.

Результаты измерений занесите в таблицу. Ее форму определите, исходя из числа опытов.

По итогам работы сформулируйте *выводы.*

Комментарий

Воздушный столб, находящийся в цилиндре с открытым концом, представляет собой колебательную систему, имеющую собственную частоту колебаний.

Если поднести к открытому концу цилиндра звучащий камертон, то усиление звука, свидетельствующее о наступлении резонанса, наблюдается, когда в воздушном столбе образуется стоячая волна. Один из узлов этой стоячей волны находится на поверхности воды в цилиндре, а одна из пучностей — у края цилиндра, вблизи его открытого конца.

В таком случае резонанс наступает, если расстояние от свободной поверхности воды в цилиндре равно половине длины стоячей волны, трем половинам длины стоячей волны, и так далее. Вообще резонанс наступает тогда, когда высота воздушного столба содержит нечетное число половин стоячей волны.

В установочном эксперименте постепенно наливайте в цилиндр воду до тех пор, пока не обнаружите усиление звучания камертона. Измерьте, на каком расстоянии от верхнего края цилиндра находится уровень воды в цилиндре, когда наблюдается первое усиление звука.

Продолжайте доливать воду в цилиндр, пока не обнаружите следующее усиление звука.

Снова заметьте, на каком расстоянии от верхнего края цилиндра находился уровень воды. Продолжайте эту процедуру до тех пор, пока не заполните цилиндр водой.

Теперь можно приступать к проведению измерений. Налейте в цилиндр воду до уровня, когда высота воздушного столба немного больше половины длины стоячей волны. Осторожно доливая воду, добейтесь наступления наибольшей громкости звука и измерьте половину длины звуковой волны. Аналогичные измерения проведите для другого случая резонанса.

Учитывая, что длина звуковой волны в два раза больше длины стоячей волны, и зная частоту колебаний камертона, рассчитайте длину волны звука данной частоты в воздухе и скорость звука в нем.

Оцените погрешность измерений и сделайте выводы.

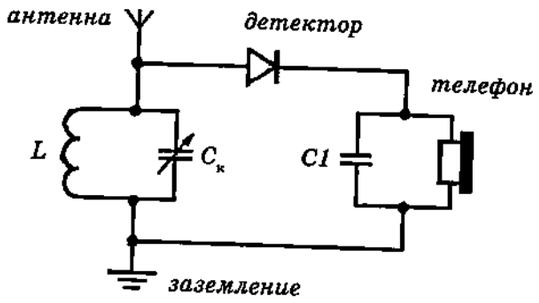
Лабораторная работа № 2

Сборка действующей модели детекторного радиоприемника

Цель работы: собрать действующую модель детекторного радиоприемника и провести прием радиопередачи.

Оборудование: лабораторный набор по радиотехнике (катушка индуктивности, конденсатор переменной емкости, полупроводниковый детектор, конденсатор постоянной емкости, наушники), антенна, заземление, набор соединительных проводов.

Схема установки



Лабораторная работа № 3

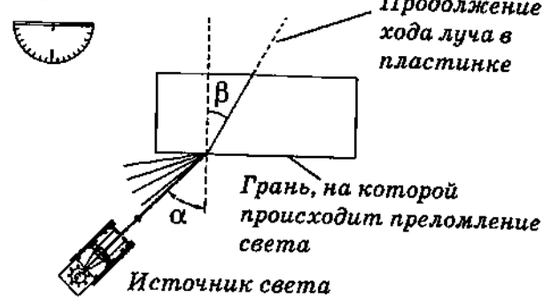
Определение показателя преломления стекла при помощи закона преломления света

Цель работы: определить показатель преломления стекла, из которого изготовлена плоскопараллельная пластинка.

Оборудование: плоскопараллельная стеклянная пластинка, источник света, экран со щелью, три булавки, транспортир, карандаш, линейка.

Установка для проведения исследования:

1 вариант



Комментарий

Радиоволны, идущие от передающих радиостанций, возбуждают в антенне быстропеременные токи.

При помощи колебательного контура, соединенного с антенной, можно выделить те колебания тока, которые происходят с частотой собственных колебаний колебательного контура.

Собственную частоту колебательного контура можно плавно менять, увеличивая или уменьшая электроемкость конденсатора в колебательном контуре.

При помощи детектора и конденсатора большой емкости, включенного параллельно наушникам, выделяют колебания тока звуковой частоты, которые приводят в колебания мембрану телефона (наушников). Сигналы близких радиостанций можно принять и услышать радиопередачу, хотя эти сигналы слабы, ведь приемник работает только за счет энергии принятой электромагнитной волны.

В данной работе предлагается собрать детекторный радиоприемник из готовых деталей и принять на телефон радиопередачу ближайшей радиостанции.

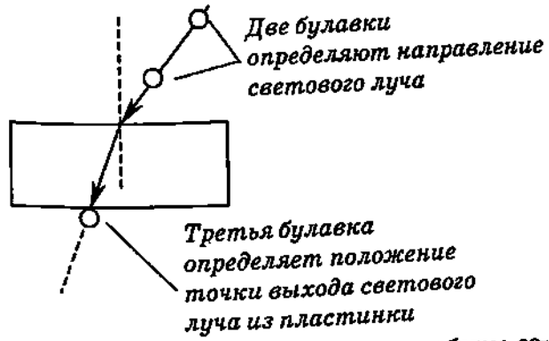
Комментарий

Чтобы правильно определить показатель преломления стекла, из которого изготовлена плоскопараллельная пластинка, нужно тщательно построить ход светового луча в ней.

Для этого можно воспользоваться источником света и экраном со щелью, который позволяет выделить узкий световой пучок (1 вариант). Можно воспользоваться законом прямолинейного распространения света и задать ход луча, падающего на грань пластинки, при помощи двух булавок. Их следует воткнуть в лист бумаги, подложив под него толстый лист картона, и расположить вертикально (2 вариант).

Ход преломленного луча внутри пластинки также задают две точки. Первая — точка падения светового луча на грань пластинки. Вторая — точка выхода луча из нее. В первом варианте эти точки определяются визуально. Во втором варианте необходимо третью булавку поставить так, чтобы она при рассматривании первых двух, расположенных по другую сторону от

2 вариант


Две булавки определяют направление светового луча
Третья булавка определяет положение точки выхода светового луча из пластинки

Продумайте план *выполнения работы*, составьте таблицу результатов измерения, внеся в нее значения угла падения, угла преломления, синусов соответствующих углов и показателя преломления (для нескольких опытов).

Число опытов определите, исходя из способа *оценки погрешности результатов измерения*. В данном случае целесообразно использовать метод среднего арифметического, так как при построении хода луча в плоскопараллельной пластинке главную роль играют случайные ошибки. Они возникают при визуальном определении точки выхода луча из пластинки.

Проведите исследование, вычислите показатель преломления стекла и сформулируйте *выводы*.

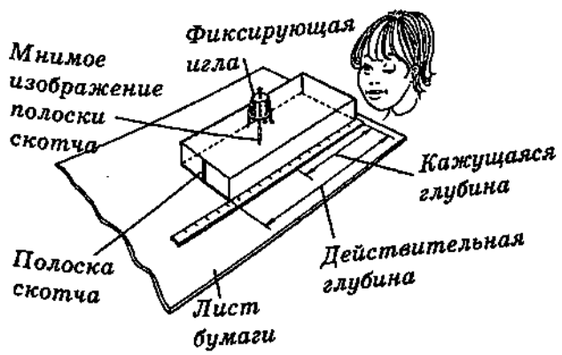
Лабораторная работа № 4

Определение показателя преломления стекла методом сравнения действительной и кажущейся глубины

Цель работы: измерить показатель преломления стекла.

Оборудование: плоскопараллельная пластинка, полоска цветного скотча, фиксирующая игла, лист бумаги, линейка, карандаш.

Установка для проведения исследования



пластины, оказалась лежащей на той же прямой, что и первые две булавки.

Перед проведением работы положите плоскопараллельную пластинку на лист белой бумаги и очертите ее контур. Теперь уберите плоскопараллельную пластину и восставьте перпендикуляр в произвольной точке границы, на которой будете изучать явление преломления.

При помощи транспортира отметьте и проведите лучи, образующие разные углы падения (например, 30°, 35°, 40°, 45°, ..., 80°).

Установите пластинку на прежнее место. Направляйте световой луч от источника света (или устанавливайте булавки) вдоль каждого отмеченного вами луча и находите точку его выхода из пластинки.

Затем снова уберите пластинку и восстановите ход каждого луча внутри пластинки. Теперь приступайте к измерению угла преломления света в каждом отдельном случае.

Результаты измерений представьте в таблице. Определите синусы углов падения и преломления для каждого случая.

Постройте график зависимости синуса угла преломления от синуса угла падения. По графику найдите показатель преломления стекла.

Комментарий

Этот метод измерения показателя преломления сводится к измерению истинной и кажущейся глубины расположения предмета (в нашем случае полоски цветного скотча, приклеенного к малой грани плоскопараллельной пластинки).

Мнимое изображение полоски скотча рассматривается через толщу плоскопараллельной пластинки.

Чтобы определить положение мнимого изображения, используется игла, воткнутая в пробку. Иглу помещают на пластину сверху и располагают так, чтобы мнимое изображение полоски скотча в пластинке образовывало с иглой одну вертикальную линию. Наблюдение следует вести одним глазом.

Когда указанное положение иглы найдено, нужно слегка изменить положение головы (покачать ее из стороны в сторону). Если при этом положение иглы и мнимого изображения полоски практически не отделяются друг от друга, то игла находится точно над мнимым изображением. Если же

Составьте план *выполнения работы*, подготовьте необходимую для записи результатов измерений таблицу и проведите установочный эксперимент, чтобы уяснить порядок действий, позволяющий определить местоположение мнимого изображения.

Погрешность измерения показателя преломления стекла.

В данном опыте проводятся прямые измерения расстояний при помощи линейки. Погрешность измерения действительной глубины примите равной цене деления линейки.

Погрешность измерения кажущейся глубины обусловлена наличием случайной ошибки. Поэтому ее нужно определить, пользуясь методом среднего арифметического. Для этого потребуется проведение примерно 10 опытов.

Погрешность косвенного измерения оцените методом относительной погрешности.

Проведите необходимые *измерения*, обработайте результаты исследования и *сделайте вывод*.

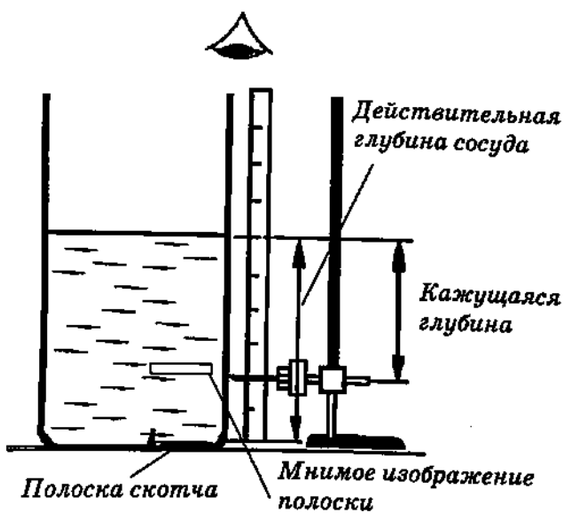
Лабораторная работа № 5

Определение показателя преломления воды методом сравнения действительной и кажущейся глубины

Цель работы: измерить показатель преломления воды.

Оборудование: высокий цилиндрический сосуд, сосуд с водой, полоска цветного скотча, фиксирующая игла, линейка, лабораторный штатив.

Установка для проведения исследования



они расходятся, то игла и мнимое изображение совмещены неточно. Тогда опыт следует повторить.

Добившись совпадения положения иглы и мнимого изображения, зафиксируйте положение иглы.

Теперь можно измерить кажущуюся глубину. Действительная глубина равна длине пластинки.

Найдите отношение действительной глубины к кажущейся. Это и есть значение показателя преломления стекла в воздухе. (При составлении отчета необходимо получить расчетную формулу, решая соответствующую задачу.)

Проведите опыт несколько раз. Необходимое количество опытов определяется из метода оценки погрешности. При измерении кажущейся глубины основной вклад в погрешность дают случайные ошибки.

Вычислите среднее значение показателя преломления и оцените погрешность измерения.

Комментарий

Этот метод измерения показателя преломления сводится к измерению истинной и кажущейся глубины расположения предмета (в нашем случае полоски цветного скотча, приклеенного ко дну сосуда с водой).

Мнимое изображение полоски скотча рассматривается через толщу воды в сосуде. Ход выполнения данной работы полностью аналогичен ходу предыдущей работы.

Положение кажущейся глубины фиксируется при помощи иглы, закрепленной в лапке штатива.

При одновременном рассматривании мнимого изображения полоски скотча и фиксирующей иглы следует добиваться их полного совмещения. (Покачивая головой из стороны в сторону, следите за тем, чтобы игла и мнимое изображение полоски не отделялись друг от друга.)

При проведении исследования вам предлагается получить зависимость кажущейся глубины от действительной глубины «водоема».

Для этого нужно в каждом следующем опыте менять количество воды в цилиндре, доливая ее постепенно до самого верха сосуда.

Таким образом, в этом исследовании вы получаете возможность построить график зависимости кажущейся глубины от

Составьте *план проведения исследования*, подготовьте рабочие таблицы для записи *результатов измерений*, представьте решение задачи об определении кажущейся глубины и запишите *формулу для расчета показателя преломления воды* в данном исследовании.

Постройте график зависимости кажущейся глубины от действительной. Оцените *погрешность измерений*, рассчитайте *результат* и сделайте *выводы*.

Лабораторная работа № 6

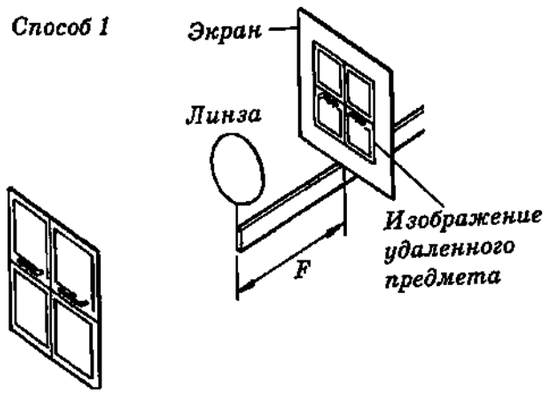
Определение фокусного расстояния собирающей линзы

Цель работы: измерить фокусное расстояние собирающей линзы.

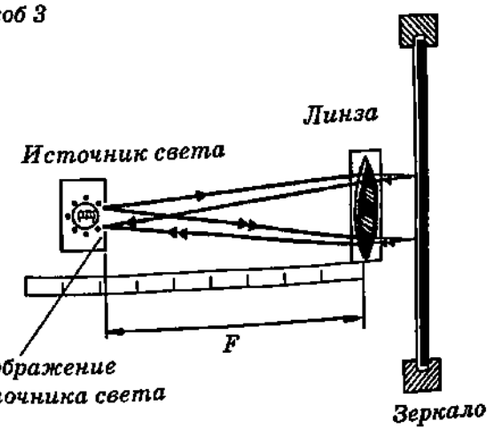
Оборудование: собирающая линза на подставке, источник света, экран для получения изображения, плоское зеркало, измерительная лента.

Установка для проведения опытов:

Способ 1



Способ 3



действительной, а затем по графику найти показатель преломления воды.

Оценка погрешности измерения показателя преломления воды проводится аналогично тому, как это было сделано в предыдущей работе.

Оформите отчет о работе и сделайте вывод.

Комментарий

В данной работе вам предлагается провести измерение фокусного расстояния собирающей линзы разными способами.

Способ 1. По определению фокуса линзы.

Получите на экране четкое изображение удаленного предмета, например, дерева, растущего за окном, или оконного переплета. Измерьте фокусное расстояние линзы.

Способ 2. Используйте для определения фокусного расстояния собирающей линзы формулу тонкой линзы.

Для этого получите на экране действительное изображение источника света. Измеряя расстояние от источника до линзы и расстояние от линзы до экрана (то есть до изображения), рассчитайте по формуле линзы ее фокусное расстояние.

Способ 3. При помощи плоского зеркала.

Воспользуйтесь обратимостью хода лучей в линзе. Расположите источник света и плоское зеркало по разные стороны от собирающей линзы.

Если источник поместить в фокус линзы, то за линзой образуется параллельный пучок лучей. После отражения от зеркала этот пучок пройдет через линзу (в обратном направлении) и даст изображение в фокусе линзы, то есть там, где расположен сам источник.

Таким образом, в данном способе измерения фокусного расстояния источник света и экран располагают в одной плоскости и, постепенно приближая их к линзе, добиваются получения на экране такого изображения источника, которое в точности совпадает с источником. Расстояние, на котором получен такой эффект, равно фокусному расстоянию линзы.

Проведите измерение фокусного расстояния одной и той же линзы разными способами. Оцените погрешность измерения. Сравните полученные результаты между собой.

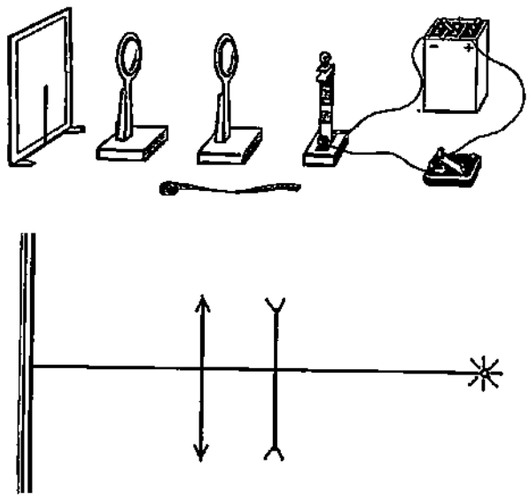
Лабораторная работа № 7

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Цель работы: измерить фокусное расстояние рассеивающей линзы.

Оборудование: рассеивающая линза, собирающая линза на подставке, источник света, экран для получения изображения, измерительная лента.

Установки для проведения опытов:



Аккуратно выполните построение хода лучей сначала в рассеивающей линзе, затем в системе рассеивающей и собирающей линз, и, наконец, в собирающей линзе. Сравнение этих чертежей позволит вам определить, какие измерения нужно провести в данной работе.

Лабораторная работа № 8

Наблюдение явлений интерференции и дифракции света

Цель работы: провести наблюдение явлений интерференции и дифракции света в ряде опытов и дать объяснение наблюдаемым эффектам с позиции волновой теории света.

Оборудование: мыльный раствор, кусок капроновой ленты, батистовый платок, две стеклянные пластинки, кусок грампластинки, компакт-диск, птичье перо, тальк, источник света.

Продумайте *ход выполнения работы*. Каждый опыт следует описать отдельно. Описание следует подтвердить выполнением чертежей и словесным объяснением наблюдаемых эффектов.

Комментарий

В данной работе вам предлагается провести измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы.

Расположите между источником света и экраном рассеивающую линзу и убедитесь, что на экране образуется светлое пятно.

Начертите ход лучей в рассеивающей линзе и покажите на чертеже положение мнимого изображения.

Теперь поставьте между экраном и рассеивающей линзой собирающую линзу и найдите такое ее положение, при котором на экране образуется четкое изображение источника света.

Изобразите ход лучей через систему этих линз в данном случае. Обратите внимание: при построении можно считать, что на собирающую линзу падают лучи света, выходящие из мнимого изображения источника в рассеивающей линзе.

Уберите рассеивающую линзу. Не меняя положения собирающей линзы по отношению к экрану, передвигайте источник света так, чтобы на экране снова получилось его изображение. Постройте ход лучей в данном случае.

Сравните между собой два последние чертежа и сообразите, какие два измерения надо выполнить, чтобы вычислить фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле тонкой линзы.

Повторите опыт, проводя необходимые измерения, а по ним рассчитайте фокусное расстояние рассеивающей линзы.

Оцените погрешность измерения методом относительной погрешности.

Сделайте вывод.

Комментарий

В данной работе вам предлагается провести наблюдение явлений дифракции и интерференции света в следующих опытах:

— наблюдение цветов в тонких пленках;
— наблюдение картины интерференции, возникающей в отраженном свете от двух стеклянных пластин, между которыми проложена тонкая нить или волос;
— наблюдение прохождения света через узкую щель между указательным и средним пальцами руки;
— наблюдение источника света через лоскут из капрона или из батиста; через волоски птичьего перышка, через ресницы;
— наблюдение источника света через стеклянную пластинку, припорошенную тонким слоем талька;
— наблюдение отражения света от поверхности грампластинки и компакт-диска.

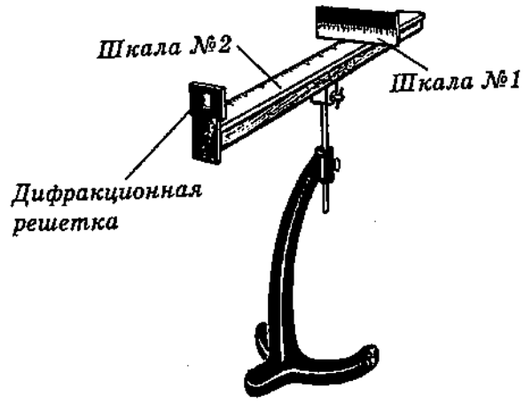
Лабораторная работа № 9

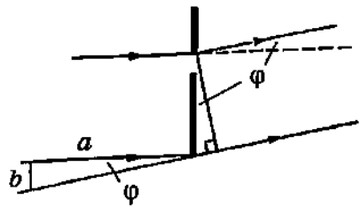
Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки

Цель работы: получить на экране дифракционный спектр и измерить длину световой волны красного и фиолетового цвета.

Оборудование: дифракционная решетка с известной постоянной, источник света, прибор для определения длины световой волны.

Схема установки:





$$d\sin\varphi = k\lambda;$$

$$\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi \approx \frac{b}{a};$$

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

Продумайте и составьте план *выполнения работы*. Результаты измерений удобно записывать в таблицу. Форму таблицы предложите сами.

Для *оценки погрешности* воспользуйтесь методом среднего арифметического, так как возможны случайные ошибки при определении направления на данный цвет в спектре, и методом относительной погрешности.

Запишите результат измерений для границ спектра видимого света и сделайте *вывод*.

Комментарий

В данной работе вам предстоит получить на экране (шкала №1) при помощи дифракционной решетки дифракционный спектр.

Для этого нужно через дифракционную решетку и прорезь в отверстии экрана (шкала №1) смотреть на источник белого света. Тогда на экране, по обе стороны от его центра, вы увидите расположенные симметрично дифракционные спектры первого и второго порядка.

Ближайшая пара спектров — спектры первого порядка соответствуют разности хода, равной λ (для каждого цвета своя длина волны). Спектру второго порядка соответствует разность хода волн, равная 2λ и так далее. Постоянная решетки известна, следовательно, чтобы найти длину волны света соответствующего цвета нужно найти угол дифракции φ.

Это — угол, образованный падающим на решетку параллельным пучком лучей (он идет вдоль линейки со шкалой №2) и направлением на ту часть спектра первого (или второго) порядка, для которой хотим найти длину волны.

Следовательно, его можно найти, так как расстояние a (см. пояснительный рисунок) считываем по шкале № 2, а расстояние b — по шкале № 1.

Если расположить экран (шкала №1) на самом краю линейки, то угол дифракции будет достаточно мал, так что синус этого угла можно заменить на тангенс, а он, в свою очередь, равен отношению b к a.

Таким образом, измерение длины световой волны сводится к измерению указанных отрезков, расчету соответствующего угла дифракции и применению формулы дифракционной решетки.

Проведите измерение длины световой волны красного и фиолетового цвета в нескольких опытах, используя для этого спектры первого и второго порядков, расположенные по обе стороны от центра, полученные на разных расстояниях b от решетки. Результат усредните для каждого цвета и оцените погрешность измерений.

Предметно-именной указатель

Абсолютная температура 103
Абсолютно упругая среда 5
Абсолютно черное тело 103
Абсолютный показатель преломления 80
Акустика 37
Акустический резонанс 40
Амплитуда 6, 39
Антенна 48

Бор Н. 128

Вавилов С. И. 114
Вектор магнитной индукции 8
Взаимодействие электромагнитное 8, 9
Вибратор Герца 43
Волна
— бегущая 11
— звуковая 37
— механическая 6-7
— монохроматическая 60
— плоская 12, 21
— поляризованная 47
— поперечная 11
— продольная 11
— световая 59
— стоячая 34-36
— сферическая 12, 21
— электромагнитная 8
Волновая поверхность 20
Волновой фронт 20

Галилей Г.
— принцип относительности 130, 131
Гамма-лучи 106
Герц Г. 45
— опыты 44, 45, 46
Глаз 79
Громкость звука 39
Гюйгенс Х. 22
— принцип 19, 22

Давление света 117
Демодуляция 49, 50
Детектирование сигнала 49, 50
Детекторный радиоприемник
— сборка 148
Диоптрия 90
Дисперсия света 68, 69
Дифракция
— волн 27, 31
— нейтронов 128
— света 64
— — на щели 65
— — от проволоки 64
— электронов 128
Дифракционная решетка 67
Длина волны 10, 13
— — звука 38
— — света 59
— — фотона 114
Дуализм волна-частица 127, 128
Заземление 48
Закон
— Гука 5
— отражения волн 24
— отражения света 80
— преломления волн 25
— преломления света 80
— прямолинейного распространения волн (света) 26, 79
— сложения скоростей 131
— — релятивистский 140
— фотоэффекта 111
Затмение
— лунное 82
— солнечное 82
Звук 3, 37
Зеркала Френеля 76
Зеркало плоское 82
— изображение 82, 83
— построение изображения 82
— свойства изображения 83
Зоны Френеля 66
Зонная пластинка 66
Зрение 79, 100

Излучение
— видимое (свет) 106
— звуковое 39
— инфракрасное 4, 106
— рентгеновское 106, 123
— тепловое 102, 103
— ультрафиолетовое 106
— электромагнитное 106
Измерение
— времени в СТО 135
— длины звуковой волны 147
— — световой волны 153
— показателя преломления стекла 148,149
— — воды150
— постоянной Планка 113, 126
— скорости звука 38, 147
— скорости света 56, 57, 58
— фокусного расстояния собирающей линзы 151
— — рассеивающей линзы 152
Изображение предмета
— в плоском зеркале 82
— в собирающей линзе 87, 91
— в рассеивающей линзе 87, 91
— действительное 91
— мнимое 91
Инерциальная система отсчета 130
Интерференция
— в тонких пленках
— волн 28, 31, 59
— света
— условия
— — максимумов 30
— — минимумов 30
— электронных пучков 128
Инфразвук 39
Испускание света 103
Источник
— волн 5
— звука 37
— протяженный 20
Источник
— света 81
— точечный 19

Камертон 40
Катодолюминесценция 102
Квант излучения 104
Когерентность 30, 59
Когерер 48
Колебания
— вынужденные 7
— свободные 6
Кольца Ньютона 62, 63
Комета
— направление хвоста 118
Контур колебательный 43
— вынужденные колебания 7
— открытый 43
— резонанс 44
— частота собственных колебаний 6
Корпускулярно-волновой дуализм 127,128
Красная граница фотоэффекта 111

Лебедев П. Н. 118
Линза
— главная оптическая ось 87
— главное фокусное расстояние 88
— оптический центр 88
— побочная оптическая ось 88
— построение изображения 91
— рассеивающая 90
— свойства изображения 91
— собирающая 90
— тонкая 87
— фокальная плоскость 88
— фокус 88
Лоренц Х.
— преобразования 137
Луч 20
Люминесценция 102

Майкельсон А. 132
Максвелл Дж. 8
Маркони Г. 50
Масса
— покоя 142
— фотона 114
Механизм образования волн 6, 7
Модуляция 50
— амплитудная 50
— частотная 50
— фазовая 50

Наложение волн 28
Напряжение запирания 110
Нейтрон
— дифракция 128

Одновременность 135
Оптика
— волоконная 84
— волновая 55
— геометрическая 55, 79
— физическая 55
Оптическая сила
— линзы 90
— системы линз 99
Опыт
— Герца Г. 44, 45, 46
— Майкельсона – Морли 132
— Мерсенна М. 38
— Ремера О. 56
— Столетова А. Г. 108, 109
— Физо И. 57
— Фуко Ж. 58
— Юнга Т. 64
Осциллятор Планка
— гармонический 105
— энергия 105
Относительность
— механического движения 131
— длины 138
— одновременности 135, 136
— промежутков времени 139
Относительности
— принцип Галилея 130, 131
— принцип Эйнштейна 134
— специальная теория 130
Отражение 23

— волн 23
— звука 37
— полное внутреннее 83
— света 79
— — диффузное 79
— — зеркальное 79

Период 6, 10
Планк М. 103
Плоская волна 12, 21
Плоскость поляризации 47
Поглощение
— звука 39
— кванта света112
— света103
Показатель преломления 26
— абсолютный 80
— относительный 80
Поле
— электромагнитное 8, 9
Полное отражение света 83
Полутень 81
Поляризатор 72
Поляроиды 73
Попов А. С. 48
Постоянная Планка 105
— измерение 113
Постулаты
— теории относительности 134
Правило Ленца 9
Преломление 23
— волн 23
— света 69, 83
— — на сферической поверхности 84, 85
Преобразования
— Галилея 137
— Лоренца 137
Принцип
— Гюйгенса 19
— Гюйгенса-Френеля 23
— относительности Галилея 131
— относительности Эйнштейна 134
— соответствия 128
— суперпозиции 9
Просветление оптики 62
Пучность стоячей волны 36
Пятно Пуассона 66

Работа выхода электрона 112
Равновесие устойчивое 5
Радиовещание 49
Радиоволны
— диапазон 51
— длинные 51
— короткие 51
— средние 51
— ультракороткие 51
Радиолокация 51, 52
Радиосвязь 48
Радиотелеграфная связь 49
Разность хода волн 29
— геометрическая 61
— оптическая 61
Резонанс 40, 44
— акустический 40
Ремер О. 57
Решетка дифракционная 67

Свет 3
— видимый 3
— естественный 71
— монохроматический 60
— поляризованный 71
Сдвиг фаз
— при отражении света 60
Сила тока насыщения 109
Сила упругости 5
Синхронизация часов 136
Синхрофазатрон 143
Скорость
— волны 10
— звука 38
— — измерение 38
— света 56
— измерение 56
— — астрономический метод 56
— — лабораторный метод 57
Солнечные батареи 116
Солнечный ветер 119
Спектр
— дисперсионный 68, 70
— дифракционный 70
— излучения 68
— линейчатый102
— непрерывный 68
— сплошной 68
— поглощения 68
— электромагнитных волн 106
Столетов А. Г. 107
Стоячие волны 34

Тело абсолютно черное 103
Тембр 39
Тень 27, 81
Теория
— относительности специальная 130
— Планка излучения черного тела 103
— фотоэффекта Эйнштейна 112

Угол
— отражения 24
— падения 24
— предельны й полного отражения 84
— преломления 25
Угловая частота 6, 10
Узел стоячей волны 36
Ультразвук 39
Ультрафиолетовая катастрофа 104
Уравнение
— бегущей волны 11, 12
— гармонического колебания 6
— Эйнштейна для фотоэффекта 112
Уровни энергии
— гармонического осциллятора 105
Условие
— максимума интерференции 30
— минимума интерференции 30
— резонанса 40
— когерентности волн 30, 59

Фаза колебания 6, 10
— частиц в волне 12
Физо И. 57
Флуоресценция 102
Фокальная плоскость линзы 88
Фокус линзы 88
Фокусное растояние 88
Формула
— Планка 105
— Эйнштейна 143
Фосфоресценция 102
Фотон 112, 114
Фотоэлемент 115
— вакуумный 115
— полупроводниковый 116
Фотоэффект 107
— опыты Столетова 108, 109
— законы 109
— красная граница 111
Френель О.
— принцип 59
Фуко Ж. 58

Цвета
— спектральные 68
— тонких пленок 60
Циклотрон 143

Частица
— света 112, 114
— элементарная 145
Частота 6, 10
— диапазон видимого света 68, 69
— диапазон звуковой 38
— резонансная 40
— собственная 6
— фотона 114
— циклическая 6, 10

Эйнштейн А. 112
Электромагнитная волна 42
— свойства 42, 43
Электромагнитное излучение
— давление 117
— импульс 114
— интенсивность 42
— луч 14
— плотность энергии 42
— — потока 42
— поляризация 72
— уравнение 14
— фронт 20
— энергия 42
Электрон
— дифракция 128
Электрон-вольт 112
Энергия
— внутренняя 143
— волны 10
— кинетическая 144
— покоя 143
— полная 143
— электромагнитного излучения 42
Эфир 130
«Эфирный ветер» 132
Эхо 39

Юнг Т. 59
— опыт 64

Содержание

ВОЛНЫ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ 3

§ 1. ВОЛНЫ В УПРУГИХ СРЕДАХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА 4

§ 2. УРАВНЕНИЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ 11

§ 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ 15

§ 4. ВОЛНЫ В СРЕДЕ. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА 19

§ 5. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛН. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН 23

§ 6. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛН. ДИФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ 27

§ 7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ О СВОЙСТВАХ ВОЛН 32

§ 8. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ И ИХ СВОЙСТВА 37

§ 9. АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС 40

§ 10. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. ОПЫТЫ ГЕРЦА 42

§ 11. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ 48

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 53

ОПТИКА 54

§ 12. ФИЗИЧЕСКАЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА 55

§ 13. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ 59

§ 14. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА 64

§ 15. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА 68

§ 16. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА 71

§ 17. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ВОЛНОВАЯ ОПТИКА» 74

§ 18. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА 79

§ 19. ЛИНЗА. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ 87

§ 20. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА» 91

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 101

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА 102

§ 21. ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ. ПОНЯТИЕ КВАНТА 103

§ 22. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. ОПЫТЫ А. Г. СТОЛЕТОВА 107

§ 23. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА. ФОТОНЫ 112

§ 24. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА 115

§ 25. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА 117

§ 26. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА 120

§ 27. КОРПУСКУЛЯРНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ 127

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 129

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ 130

§ 28. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА - МОРЛИ. ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ 131

§ 29. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ РАССТОЯНИЙ И ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ 135

§ 30. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА 140

§ 31. ИМПУЛЬС И ЭНЕРГИЯ. ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ 143

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ 146

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ №1 147

Лабораторная работа № 1.
Определение длины звуковой волны и скорости звука в воздухе методом акустического резонанса 147

Лабораторная работа № 2.
Сборка действующей модели детекторного радиоприемника 148

Лабораторная работа № 3.
Определение показателя преломления стекла при помощи закона преломления света 148

Лабораторная работа № 4.
Определение показателя преломления стекла методом сравнения действительной и кажущейся глубины 149

Лабораторная работа № 5.
Определение показателя преломления воды методом сравнения действительной и кажущейся глубины 150

Лабораторная работа № 6.
Определение фокусного расстояния собирающей линзы 151

Лабораторная работа № 7.
Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы 152

Лабораторная работа № 8.
Наблюдение явлений интерференции и дифракции света 152

Лабораторная работа № 9.
Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки 153

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 154

СТЕПАНОВА Галина Николаевна

ISBN 5-98198-005-2

9 785981 980053

ФИЗИКА

11 класс

I полугодие

Учебник
для общеобразовательных
учреждений

Редактор А. П. Степанов

Технический редактор Л. И. Длугоборская

Художник Ю. А. Апанасович

Компьютерная верстка М. В. Усачева

Подписано в печать 23.07.2004. Формат 60×90 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура «Школьная». Печать офсетная.
Печ. л. 10. Доп. тираж 3000 экз. Заказ № 2944.

Издательство «СТП Школа».
193015, Санкт-Петербург, Тверская, 8.
Тел./факс (812) 379-1789.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ФГУП «Печатный двор»
Министерства РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15.

ST.P
SCHOLA